

**DETERMINACIÓN DE LOS COEFICIENTES CINÉTICOS PARA EL DISEÑO DE  
LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN EN LA INDUSTRIA ALIMENTARIA, CASO  
PRODUCTOS RAMO S.A.**

**CAMILA LARGO VILLAMIZAR  
DANNY ALEJANDRA ROMERO ROBAYO**

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL  
MODALIDAD TRABAJO DE GRADO  
BOGOTÁ D.C.  
2018**

**DETERMINACIÓN DE LOS COEFICIENTES CINÉTICOS PARA EL DISEÑO DE  
LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN EN LA INDUSTRIA ALIMENTARIA, CASO  
PRODUCTOS RAMO S.A.**

**CAMILA LARGO VILLAMIZAR  
CÓDIGO: 505086  
DANNY ALEJANDRA ROMERO ROBAYO  
CÓDIGO: 504999**

**Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Civil**

**Director  
FELIPE SANTAMARÍA ALZATE  
Ingeniero Sanitario**

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL  
MODALIDAD TRABAJO DE GRADO  
BOGOTÁ D.C.  
2018**



## Atribución-NoComercial-SinDerivadas 2.5 Colombia (CC BY-NC-ND 2.5)

La presente obra está bajo una licencia:  
**Atribución-NoComercial-SinDerivadas 2.5 Colombia (CC BY-NC-ND 2.5)**

Para leer el texto completo de la licencia, visita:  
<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.5/co/>

**Usted es libre de:**



Compartir - copiar, distribuir, ejecutar y comunicar públicamente la obra

**Bajo las condiciones siguientes:**



**Atribución** — Debe reconocer los créditos de la obra de la manera especificada por el autor o el licenciante (pero no de una manera que sugiera que tiene su apoyo o que apoyan el uso que hace de su obra).



**No Comercial** — No puede utilizar esta obra para fines comerciales.



**Sin Obras Derivadas** — No se puede alterar, transformar o generar una obra derivada a partir de esta obra.

Nota de Aceptación:

---

---

---

---

---

---

Firma del presidente del jurado

---

Firma del jurado

---

Firma del jurado

Bogotá D.C. 22 de mayo de 2018

## DEDICATORIA

### *A Dios*

Por habernos permitido llegar hasta este punto y habernos dado salud para lograr los objetivos propuestos.

### *A nuestros padres*

Por haber sido los pilares fundamentales en la persona que somos hoy, cada acción que realizamos, se da gracias a cada valor enseñado, cada error corregido, cada momento de motivación constante y al enseñarnos la perseverancia como única salida a cada obstáculo. Gracias por su incondicional apoyo, conservado a través del tiempo.

### *A nuestros docentes*

Por su gran apoyo y motivación para la culminación de nuestros estudios profesionales, para la elaboración de esta tesis y nuestra formación profesional y personal.

## **AGRADECIMIENTOS**

El agradecimiento más profundo a la Universidad Católica de Colombia, que nos brindó un espacio académico en el cual desarrollar cada una de nuestras habilidades, y que no solo nos formó como profesionales en la ingeniería civil, sino que también personas.

Al Ingeniero Felipe Santamaría, director del presente estudio, por la paciencia y apoyo en el desarrollo de este trabajo de investigación.

A la Ingeniera Laura Cuervo, ingeniera ambiental de Productos Ramo, por el apoyo brindado.

## CONTENIDO

DEDICATORIA .....	5
AGRADECIMIENTOS.....	6
ABREVIATURAS .....	16
RESUMEN.....	18
INTRODUCCIÓN .....	19
1. ANTECEDENTES.....	21
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	25
2.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA .....	25
2.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA .....	25
3. OBJETIVOS.....	27
3.1. GENERAL.....	27
3.2. ESPECÍFICOS.....	27
4. JUSTIFICACIÓN.....	28
5. ALCANCES Y LIMITACIONES.....	29
5.1. ESPACIO.....	29
5.2. TIEMPO.....	29
5.3. CONTENIDO .....	29
5.4. ALCANCE.....	29
6. MARCO DE REFERENCIA .....	30
6.1. MARCO TEÓRICO .....	30
6.2. MARCO CONCEPTUAL.....	41
6.3. MARCO HISTÓRICO.....	46
6.4. MARCO LEGAL.....	47
7. ESTADO DEL ARTE .....	50
7.1. RENDIMIENTO HIDRÁULICO DE UN ESTANQUE DE ESTABILIZACIÓN DE AGUAS RESIDUALES PROFUNDAS.....	50
7.2. VERIFICACIÓN DE DOS COEFICIENTES DE DISEÑO PARA LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN .....	50
7.3. EVALUACIÓN DEL COEFICIENTE DE REACCIÓN (K) PARA SISTEMAS DE LAGUNAS FACULTATIVAS A GRAN ESCALA.....	51

7.4. CONSTANTES CINÉTICAS EN LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN (CASO DE UNA REGIÓN CON CLIMA SECO-SEMIÁRIDO) .....	52
7.5. EFICIENCIA DE LAS LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN DE LA CIUDAD DE CATAMARCA Y SU RELACION CON LA ESTIMADA POR LOS MODELOS DE DISEÑO.....	53
7.6. DETERMINACIÓN DE PERFILES, CONSTANTES CINÉTICAS Y ECUACIONES DE DISEÑO EN UNA LAGUNA FACULTATIVA.....	54
7.7. ANÁLISIS CINÉTICO DE LA ELIMINACIÓN DE MATERIA ORGÁNICA EN UN ESTANQUE DE ESTABILIZACIÓN EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO AGUAS RESIDUALES DE BIRJAND .....	55
7.8. DETERMINACIÓN DE LOS COEFICIENTES DE REACCIÓN DEL CRECIMIENTO BIOLÓGICO Y DECAIMIENTO ENDÓGENO EN LAS LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN DEL MUNICIPIO DE ZIPAQUIRÁ. ....	56
7.9. CARGA SUPERFICIAL MÁXIMA EN LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN DE NICARAGUA .....	57
8. METODOLOGÍA.....	59
8.1. TIPO DE ESTUDIO.....	60
8.2. FUENTES DE INFORMACIÓN.....	60
9. DISEÑO METODOLÓGICO .....	61
9.1. DESARROLLO METODOLÓGICO.....	61
9.2. HERRAMIENTA DE PREDIMENSIONAMIENTO DE LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN .....	64
9.3. VARIABLES.....	64
10. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	65
10.1. LOCALIZACIÓN .....	65
10.2. DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA .....	65
11. RESULTADOS .....	70
11.1. DATOS HISTÓRICOS.....	70
11.2. ANÁLISIS DE LABORATORIO.....	71
11.3. CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA .....	72
11.4. EFICIENCIA DEL SISTEMA.....	73
11.5. VERIFICACIÓN DE CARGAS ORGÁNICAS.....	74
11.6. LAGUNAS ANAEROBIAS .....	74
11.7. LAGUNAS FACULTATIVAS.....	76
12. ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	80
12.1. EFICIENCIA DEL SISTEMA.....	80



12.2. LAGUNA ANAEROBIA.....	83
12.3. LAGUNA FACULTATIVA.....	84
13. CONCLUSIONES.....	90
14. RECOMENDACIONES.....	92
BIBLIOGRAFÍA.....	93
ANEXOS.....	98

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama del proceso de una laguna anaeróbica .....	31
Figura 2. Diagrama laguna facultativa .....	35
Figura 3. Representación esquemática de la actividad de algas y bacterias en lagunas facultativas. ....	35
Figura 4. Flujo pistón .....	38
Figura 5. Flujo disperso .....	39
Figura 6. Clasificación de los sólidos en las aguas residuales .....	41
Figura 7. Metodología .....	63
Figura 8. Ubicación del sistema de tratamiento .....	65
Figura 9. Esquema del proceso de tratamiento de agua residual .....	66
Figura 10. Laguna anaerobia N° 1 (Entrada al sistema) .....	66
Figura 11. Laguna anaerobia 2 y 3. ....	67
Figura 12. Laguna facultativa.....	68
Figura 13. Plano hidráulico del sistema de tratamiento. ....	69
Figura 14. Corte laguna facultativa y anaerobia.....	69
Figura 15. Laguna facultativa con materia vegetal.....	85

## LISTA DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Carga orgánica volumétrica para lagunas anaerobias .....	75
Gráfica 2. Eficiencia de remoción para el modelo de mezcla completa .....	77

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Criterios de diseño para lagunas anaerobias en función de la temperatura .....	33
Tabla 2. Relación entre los parámetros en lagunas anaeróbias. ....	33
Tabla 3. Marco Legal .....	48
Tabla 4. Relación de resultados del estudio de constantes cinéticas en lagunas de estabilización (caso de una región con clima seco-semiárido) .....	53
Tabla 5. Eficiencia de remoción de materia orgánica estimada por los modelos de diseño y determinada experimentalmente en los módulos N° 1, 2 y 3 del sistema. ....	54
Tabla 6. Eficiencia de remoción de materia orgánica estimada por los modelos de diseño y la obtenida en los módulos N° 3, 4 y 5 del sistema. ....	54
Tabla 7. Determinación de coeficientes cinéticos de remoción de materia orgánica en el sistema de lagunas de estabilización.....	55
Tabla 8. Dimensiones de diseño para las lagunas anaerobias.....	67
Tabla 9. Resultados de caracterización del año 2016 .....	70
Tabla 10. Resultados de caracterización del año 2017 .....	70
Tabla 11. Caudal del sistema.....	70
Tabla 12. Resultados del primer muestreo .....	71
Tabla 13. Resultados del segundo muestreo.....	71
Tabla 14. Resultados del tercer muestreo .....	71
Tabla 15. Profundidad de las lagunas facultativas.....	72
Tabla 16. Dimensiones reales de las lagunas facultativas.....	72
Tabla 17. Dimensiones de las lagunas anaerobias.....	73
Tabla 18. Porcentaje de remoción del sistema .....	73
Tabla 19. Relación de biodegradabilidad de las lagunas.....	73
Tabla 20. Cargas orgánicas teóricas .....	74
Tabla 21. Carga orgánica volumétrica, laguna anaerobia.....	74
Tabla 22. Coeficiente K mediante flujo pistón y mezcla completa (21/11/17) .....	76
Tabla 23. Coeficiente K mediante flujo pistón y mezcla completa (14/12/17) .....	76
Tabla 24. Coeficiente K mediante flujo pistón y mezcla completa (25/01/18) .....	76
Tabla 25. Coeficientes de remoción con el método gráfico .....	78
Tabla 26. Constante (K) para para flujo arbitrario (14/12/17).....	78
Tabla 27. Constante (K) para para flujo arbitrario (21/11/17).....	78
Tabla 28. Constante (K) para para flujo arbitrario (25/02/18).....	79
Tabla 29. Porcentajes de remoción para lagunas anaerobias y facultativas .....	80
Tabla 30. Valores de DBO <sub>5</sub> en los diferentes puntos de muestreo .....	81
Tabla 31. Comparación entre la DBO salida teórica y práctico.....	82
Tabla 32. Valores de la DBO <sub>5</sub> , DQO y pH al final del tratamiento .....	83
Tabla 33. Concentración de lagunas facultativas.....	86
Tabla 34. Constante cinética (K) promedio para flujo pistón.....	86
Tabla 35. Constantes de remoción para mezcla completa .....	87

Tabla 36. Resultados de los coeficientes de remoción (K) para los 3 patrones de flujo .....	89
---	----

## LISTA DE ECUACIONES

Ecuación 1. Correlación sudafricana .....	32
Ecuación 2. Periodo de retención nominal, correlación sudafricana .....	32
Ecuación 3. Modelo de mezcla completa, lagunas anaerobias .....	32
Ecuación 4. Modelo de Vincent.....	32
Ecuación 5. Carga orgánica volumétrica .....	33
Ecuación 6. Determinación de DBO .....	34
Ecuación 7. Mezcla completa y Cinética de primer orden .....	35
Ecuación 8. Flujo arbitrario .....	36
Ecuación 9. Constante a .....	36
Ecuación 10. Número de dispersión según Polprasert .....	36
Ecuación 11. Número de dispersión según Sáenz .....	36
Ecuación 12. Modelo de flujo pistón .....	37
Ecuación 13. Modelo semiempírico de Marais .....	37
Ecuación 14. Modelo semiempírico de Gloyna .....	37
Ecuación 15. Carga orgánica.....	42
Ecuación 16. Carga orgánica superficial.....	43
Ecuación 17. Carga orgánica volumétrica .....	43
Ecuación 18. Tiempo de retención.....	43
Ecuación 19. Coeficiente de reacción de Brasil.....	52
Ecuación 20. Carga orgánica removida, determinada en Zipaquirá .....	56
Ecuación 21. Carga orgánica removida, en función del periodo de retención .....	57
Ecuación 22. Carga Orgánica Volumétrica para lagunas anaerobias.....	75
Ecuación 23. Remoción de carga orgánica para lagunas anaerobias .....	86

## LISTA DE ANEXOS

Anexo A. Reporte de laboratorio primer muestreo .....	98
Anexo B. Reporte de laboratorio segundo muestreo .....	99
Anexo C. Reporte de laboratorio tercer muestreo.....	100
Anexo D. Puntos de toma de muestra y esquema del sistema.....	101
Anexo E. Resultados de laboratorio de otros parámetros.....	102

## ABREVIATURAS

a: Constante utilizada en el flujo disperso  
A: Área superficial de la laguna, m<sup>2</sup>.  
ARI: Aguas residuales industriales.  
C: Concentración de DBO en el efluente, mg/L.  
C<sub>o</sub>: Concentración de carga orgánica en el afluente, mg/L.  
CAR: Corporación autónoma regional.  
CEPIS: Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente,  
CO<sub>2</sub>: Dióxido de carbono,  
COS: Carga orgánica superficial, kg DBO/ m<sup>2</sup> – día,  
COV: Carga orgánica volumétrica de DBO, g/m<sup>3</sup> -día.  
C<sub>sa</sub>: Carga superficial aplicada.  
C<sub>SM</sub>: Carga superficial máxima.  
C<sub>sr</sub>: Carga superficial removida.  
d: número de dispersión del flujo, adimensional.  
DBO: Demanda biológica de oxígeno o demanda bioquímica de oxígeno (mgO<sub>2</sub>/L).  
DBO<sub>5</sub>: DBO medida transcurrida a los cinco días (mgO<sub>2</sub>/L).  
DBO<sub>i</sub>: concentración inicial de DBO en el afluente, mg/L.  
DQOBT: DQO biodegradable total.  
DBO<sub>e</sub>: DBO de entrada.  
DBO<sub>s</sub>: DBO de salida.  
DQO: Demanda química de oxígeno (mgO<sub>2</sub>/L).  
DQOLB: DQO lentamente biodegradable.  
DQONBT: DQO no biodegradable total o inerte.  
DQORB: DQO rápidamente biodegradable.  
E: Eficiencia.  
F: Flujo.  
IDEAM: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.  
K: Coeficiente de remoción de DBO a la temperatura del líquido, días<sup>-1</sup>.  
K<sub>n</sub>: Constante de degradación asumiendo mezcla completa (días<sup>-1</sup>).  
L: DBO (mg/L) remanente del agua para t = 0.  
M.C.: Mezcla completa.  
OH<sup>-</sup>: Hidroxilo.  
OD: Oxígeno disuelto.  
n: Exponente determinado experimentalmente.  
N.D: No Determinado  
PR: Periodo de retención nominal (días).  
PTAR: Planta de Tratamiento de Aguas Residuales  
RAS: Hace referencia a reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico.  
Q: Caudal, m<sup>3</sup>/día.  
S: DBO<sub>5</sub> del efluente de la laguna anaerobia, en mg/L.  
S<sub>a</sub>: DBO<sub>5</sub> del afluente de la laguna anaerobia, en mg/L.



SD: Sólidos disueltos.  
SDI: Sólidos disueltos inorgánicos.  
SDV: Sólidos disueltos volátiles.  
SF: Sólidos fijos.  
SS: Sólidos suspendidos.  
SSI: Sólidos suspendidos inorgánicos.  
SSV: Sólidos suspendidos volátiles.  
SST: Sólidos suspendidos totales.  
SV: Sólidos volátiles.  
T: Temperatura, °C.  
 $\theta$ : Tiempo de retención hidráulica, días.  
V: Volumen de la laguna, m<sup>3</sup>.  
y: DBO ejercida por el agua después de un tiempo t, mg/L.

## RESUMEN

Las lagunas de estabilización son un sistema de tratamiento de agua residual de tipo biológico, que a pesar de requerir una inversión importante para su construcción tiene un bajo costo en la operación y mantenimiento. Los modelos cinéticos empleados para el diseño de lagunas de estabilización, utilizan constantes cinéticas de remoción que son afectadas por factores como temperatura, viento, lluvia, radiación solar, entre otros; los cuales afectan de manera directa la velocidad de la depuración del agua residual. Sin embargo, en Colombia no se han realizado estudios para definir constantes que se adecúen a las características climáticas y de las aguas residuales generadas, por lo que el diseño de estos sistemas se hace con coeficientes encontrados en estudios efectuados en otros países; lo anterior, puede ocasionar un mal dimensionamiento de las lagunas y un mal funcionamiento. Por esta razón, en la presente investigación se pretende determinar el funcionamiento de las lagunas que componen el sistema de tratamiento de una industria ubicada en la Sabana de Bogotá, así como determinar las constantes cinéticas de remoción ( $K$ ), para los 3 modelos de flujo que se pueden presentar.

## INTRODUCCIÓN

El tratamiento de aguas residuales tiene como objetivo remover los contaminantes que pueden llegar a causar una afectación en la salud humana o al ambiente, y que proviene de los vertimientos de agua industrial o doméstica a los recursos hídricos. Los contaminantes que se introduzcan en dicho efluente, sin su debido tratamiento, pueden llegar a afectar el funcionamiento biológico de autodepuración, por contener sustancias y microorganismos que alteren su ciclo, además de generar diferentes afectaciones en los seres humanos asociadas al sistema digestivo y respiratorio.

Por lo anterior, es importante garantizar la calidad de las fuentes hídricas ya que, a partir de estos, se abastece de agua potable a un gran porcentaje de la población; además de garantizarse la conservación de la flora y la fauna de ecosistemas. Por tal motivo, es fundamental que el agua residual tenga un debido proceso de descontaminación, con el fin de proteger el medio biótico y facilitar los procesos de tratamiento de agua potable que se hacen en el mismo cuerpo hídrico posterior a un vertimiento. Para esto, se establece unos valores máximos admisibles, establecido en la ley colombiana mediante la resolución 0631 de 2015 “por la cual se establecen los parámetros y valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de agua superficiales y a los sistemas de alcantarillado”<sup>1</sup>.

Actualmente se utilizan diferentes métodos para reducir los contaminantes en el agua, los cuales están reglamentados y clasificados por la resolución 0330 del 2017 en pretratamientos, tratamientos primarios (procesos físicos), secundarios (procesos químicos y biológicos) y terciarios (remoción de nutrientes y patógenos). Dentro de los procesos biológicos se encuentran las lagunas de estabilización, las cuales requieren para su diseño de constantes cinéticas de remoción y ecuaciones empíricas; establecidas mediante estudios realizados en otros países, que dependen de las condiciones climáticas del lugar, sin embargo, dichas condiciones no son las que se presentan en la sabana de Bogotá, por lo que es importante la determinación de constantes cinéticas y ecuaciones que sean representativas de esta región.

El presente trabajo de investigación busca determinar el coeficiente cinético de remoción (K), en lagunas facultativas para diferentes reactores, y la ecuación de

---

<sup>1</sup> RESOLUCIONES LASALLE. [en línea]. Bogotá: Ministerio de Medio Ambiente [citado 25 agosto, 2017]. Disponible en Internet: <<http://www.lasalle.edu.co/wps/wcm/connect/7bf35b9e-b9ac-45b3-a280-c7dec8b1499d/Resolucion+631-2015.pdf?MOD=AJPERES>>

remoción de carga orgánica para lagunas anaerobias; que sean representativas de las características en la Sabana de Bogotá, con el fin de lograr una mayor eficiencia del sistema. Lo anterior, se realizó mediante la recopilación de información proveniente de un sistema de tratamiento de agua residual, compuesto por lagunas de estabilización, construido por la empresa colombiana Productos Ramo S.A. en las instalaciones de Mosquera en Cundinamarca.

Partiendo de lo anterior, en el trabajo se presenta una explicación de lo que es una laguna de estabilización, sus tipos, cuáles son sus características, además de los factores que influyen en su funcionamiento; definiendo cuáles son los principales parámetros fisicoquímicos y microbiológicos que se tienen en cuenta para el diseño y de los cuales dependen, en gran medida, los coeficientes cinéticos de remoción, debido a los modelos de cálculo que se emplean para hallarlos.

Posteriormente, se explica el funcionamiento y las principales características del sistema de tratamiento de aguas residuales de Productos Ramo S.A., y en función de las muestras recolectadas, se estima los coeficientes cinéticos de remoción previamente establecidos a partir de expresiones matemáticas propuestas por otros autores, así como la determinación de la ecuación de remoción de carga orgánica en función de la temperatura, para efectuar su debido análisis.

## 1. ANTECEDENTES

Las aguas residuales contienen en algunos casos desechos de los procesos industriales, que deben ser removidos antes de ser descargadas en el sistema de alcantarillado. Por ese motivo, las industrias han optado por utilizar en sus sistemas de tratamiento, lagunas de estabilización, las cuales son efectivas en la degradación de materia orgánica, procesos físicos de remoción de materia suspendida, cambios químicos en la calidad del agua y eliminación de gran cantidad de microorganismos patógenos. <sup>2</sup>

La industria colombiana Productos Ramo S.A., según Pardo y Salvadores <sup>3</sup>, es una empresa de alimentos que pertenece al sector industrial panificadora y pastas de Colombia. Este sector dedicado a la fabricación de productos comestibles, realiza actividades como la panadería y pastelería. En el proceso de tratamiento de aguas residuales, que maneja la compañía para estabilizar los vertimientos resultantes de dichas actividades, es utilizado un sistema de lagunas para reducir concentraciones de materia orgánica, grasas, aceites, sólidos suspendidos y sustancias alcalinas elevadas en este tipo de industrias. Este está compuesto por 4 lagunas anaerobias y 5 lagunas facultativas en serie, dispuestas en un área de 82.000 m<sup>2</sup>, aproximadamente. Además, las lagunas anaerobias funcionan como sedimentadores y como trampa de grasas.

Para el diseño de lagunas de estabilización como las utilizadas en Productos Ramo, se utilizan expresiones matemáticas que contienen coeficientes cinéticos de remoción, los cuales dependen de factores climatológicos y, por lo tanto, puede que no se adecúen a la región donde se realiza la construcción de este tipo de sistemas. Como resultado de la falta de investigación en el país, los diseños realizados con coeficientes determinados en regiones con características diferentes, generan sobredimensionamiento y variaciones en la remoción de la carga orgánica, medida a partir de parámetros establecidos como la demanda biológica de oxígeno (DBO) y la Demanda química de oxígeno (DQO).

Según el Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento (México)<sup>4</sup>, las metodologías de diseño aplicables a lagunas anaerobias son de tipo empírico y

---

<sup>2</sup> RAMALHO, R. S., Tratamiento de aguas residuales, Barcelona, Editorial Reverté S.A. 2003. p.10.

<sup>3</sup> PARDO, Cristina y SALVADORES, María. Investigación Proyecto de Grado Organización RAMO S.A., Bogotá: Colegio de Estudios Superiores de Administración. Administración de Empresas. Proyecto de Grado, 2015. p. 6.

<sup>4</sup> COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA. Diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales: Lagunas de Estabilización. CNA. México. D.F., 2007. p.55 - 60.

cinético; mientras que en lagunas facultativas se usan metodologías empíricas, semiempíricas, cinéticas y teóricas.

En primer lugar, Yáñez<sup>5</sup> indica que la primera fórmula desarrollada usada en lagunas anaerobias es la correlación sudafricana; sin embargo, presenta variaciones en el resultado de la constante de degradación asumiendo mezcla completa ( $K_n$ ). Así, por ejemplo, Vincent reporta que para una temperatura de 22 °C la constante  $n$  es de 4.8 y  $K_n$  es de 6 días<sup>-1</sup>, para Sudáfrica. En cambio, Kawai obtuvo para Brasil un valor de  $n$  igual a 3.6 y un  $K_n$  de 38,5 días. Posterior a esto, Yáñez encontró que para el caso de Perú la constante de degradación de DBO ( $K'$ ) es de 0.593 días<sup>-1</sup> y 0.516 días<sup>-1</sup>; a partir de expresiones obtenidas de la transformación de la correlación sudafricana para la determinación del periodo de retención nominal.

Por otra parte, el Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento (México)<sup>6</sup> asegura que los métodos empíricos dan como resultados expresiones, a partir de la correlación de datos obtenidos en campo. Es así, como Kawai establece las 3 primeras fórmulas con datos de lagunas ubicadas en Brasil, las cuales determinan la DBO en el efluente en función de la DBO en el afluente o la carga orgánica volumétrica, la temperatura y el tiempo de retención. Por último, Yáñez<sup>7</sup> explica que la correlación de Saidam y Al Salem, tanto para lagunas anaerobias primarias como secundarias, en Jordania; dependen de variables como la temperatura, la carga orgánica volumétrica y el periodo de retención.

En el caso de lagunas facultativas, el Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento<sup>8</sup> asegura que los métodos empíricos y semiempíricos para carga orgánica utilizan la carga orgánica crítica (superficial o volumétrica) para realizar los diseños. Así, McGarry y Pescod reportaron una ecuación en 1970, que representa los datos obtenidos de lagunas pertenecientes a 134 plantas de todo el mundo; expresando la carga orgánica superficial en función de la temperatura ambiental. Esta misma ecuación fue reformulada en 1976 por Mara, nuevamente por Pescod y McGarry, y finalmente por Arthur en 1983. A pesar de ello, todos aseguran que es necesario calcular la carga orgánica superficial, en función de la temperatura ambiente o del fluido; con variaciones en los coeficientes que acompañan a esta variable.

---

<sup>5</sup> Yáñez, Fabián. Lagunas de estabilización. 1 ed. Ecuador: Monsalve, 1993. p.70.

<sup>6</sup> COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA. Diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales: Lagunas de Estabilización. Op. cit., 50.

<sup>7</sup> Yáñez, Fabián. Lagunas de estabilización. Op. Cit., p. 71.

<sup>8</sup> COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA. Diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales: Lagunas de Estabilización. Op. cit., p 58.

Por último, el Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento<sup>9</sup> indica que Yáñez estableció la ecuación que relaciona los valores experimentales de la tasa de reacción global (K) en Perú, en función de la temperatura y el tiempo de retención; recomendándose para periodos de retención iguales o mayores a 8 días, para el cual K es 0.38 días<sup>-1</sup>.

Asimismo, Romero<sup>10</sup> señala que las lagunas facultativas utilizan para su diseño los modelos cinéticos; como la expresión dada por Thirimurthi en el que se empleaba los diseños para reactores químicos de Wehner- Wilhelm. En esta, el factor de dispersión oscilaba de 0,0625 a 4, sin embargo, rara vez se situaba por debajo de la unidad y a su vez, se determinó que tanto el número de dispersión como la constante K, suponían una afectación importante del tiempo de retención.

Además, La Comisión Nacional Del Agua<sup>11</sup> explica que Marais y Shaw formularon una expresión parecida a la de Vincent, en la que se asimila un reactor que trabaja con un modelo de flujo de mezcla completa y con cinética de primer orden. La constante cinética empleada en esta expresión debe ser corregida, si la temperatura difiere de 35°C, debido a que en su desarrollo se empleó esta temperatura. Asimismo, Marais estableció la relación de los lodos acumulados con un modelo totalmente mezclado en lagunas primarias, y a partir de esta, se desarrolla la ecuación para el modelo de flujo pistón.

Para este tipo de lagunas, los modelos teóricos, según La Comisión Nacional Del Agua<sup>12</sup>, representan de manera matemática los procesos físicos y bioquímicos, con el fin que se produzca una degradación de la materia orgánica. En éstos se determina la eficiencia global del sistema, a partir de la tasa de control de cada fenómeno; es así, como se observa tanto el proceso de asimilación de energía solar de las algas para la producción de nuevas células, como la cantidad de oxígeno producida por éstas.

Debido a que la degradación de la materia orgánica depende principalmente de bacterias, y estas a su vez de la producción de oxígeno emitida por las algas; según La Comisión Nacional Del Agua<sup>13</sup>, se desarrolla un modelo que representa la cantidad de oxígeno que se encuentra en el agua y que depende de una constante de transferencia de oxígeno en el agua residual y de la energía solar.

---

<sup>9</sup> *Ibíd.*, p. 60.

<sup>10</sup> ROMERO, Jairo. *Lagunas de estabilización de aguas residuales*. 1 ed. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería, 2008. p.155.

<sup>11</sup> COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA. *Diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales: Lagunas de Estabilización*. Op. cit., 60.

<sup>12</sup> *Ibíd.*, p. 62.

<sup>13</sup> *Ibíd.*, p. 62.

Con esta representación matemática, se pretende determinar la cantidad de oxígeno necesario para estabilizar la carga orgánica en cada uno de los estratos de las lagunas facultativas.

También es conocido el modelo de Llavador y Prats, que según la Comisión Nacional Del Agua<sup>14</sup> tiene su base en el modelo de Fritz; en el que se describe la influencia del sustrato orgánico (S), biomasa bacterial (Xb), biomasa de algas (Xa), oxígeno disuelto (OD), nitrógeno orgánico soluble (NO), nitrógeno amoniacal (NA), nitrógeno de nitratos (NN), fósforo orgánico soluble (FO), fósforo inorgánico (M), alcalinidad total (AT) y masa sedimentada en la estabilización de la materia orgánica. A su vez, permite establecer las condiciones que generan periodos de inestabilidad en la cual se ven afectados, principalmente, el tiempo de retención y la carga orgánica.

---

<sup>14</sup> *Ibíd.*, p. 63.



## **2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

### **2.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA**

Las aguas residuales según Romero<sup>15</sup>, están compuestas por las aguas residuales además de los sólidos que se introducen y son transportados por los sistemas de alcantarillado, hasta las fuentes hídricas y en algunas ocasiones a plantas de tratamiento; las aguas residuales se dividen en domésticas, municipales e industriales.

Para el tratamiento de las aguas residuales, la compañía Productos Ramo S.A. cuenta con un sistema de depuración para tratar las aguas, que contienen restos de leche, harina, maíz, huevos, etc.; como resultado de las actividades industriales para elaborar productos alimenticios de panadería y repostería. La industria ha implementado por cerca de 50 años este tipo de tratamiento, que fue modificado en el año 2015. El sistema actual cuenta con 4 lagunas anaerobias y 5 lagunas facultativas, en las que se realiza la descontaminación de las aguas en un tiempo de retención de 30 días.

Para el diseño de lagunas de estabilización, se utilizan coeficientes cinéticos que son afectados por factores ambientales (temperatura, radiación solar, viento, etc.) y por lo tanto, varían según la región. Como consecuencia de la ausencia de estudios que se enfoquen en la determinación de coeficientes de remoción de DBO (K), representativos de una región específica en Colombia; los sistemas de lagunaje se diseñan usando coeficientes obtenidos en regiones con características climáticas diferentes, lo que puede generar una variabilidad importante entre lo diseñado y el comportamiento real del sistema de tratamiento.

### **2.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA**

Es necesario realizar estudios para la evaluación de sistemas de tratamiento de agua residual, compuestos por lagunas de estabilización en la Sabana de Bogotá o áreas afines, a través de la obtención de datos de carga orgánica, medidas en DBO; con el propósito de definir los coeficientes cinéticos de degradación a nivel industrial, para el diseño de lagunas de estabilización en estos lugares, y así, garantizar que el diseño de este tipo de tratamiento de agua residual sea más eficiente, al mejorar las condiciones de autodepuración y características físicas que se acoplen más a la realidad.

---

<sup>15</sup> ROMERO, Jairo, Lagunas de estabilización de aguas residuales, Op. Cit., p.13.

Con base en lo anterior, se identifica la siguiente problemática: no se han realizado estudios en la Sabana de Bogotá, para determinar los valores de las constantes cinéticas de remoción que representen las características climatológicas como nubosidad, radiación solar, precipitación, temperatura, entre otras; las cuales modifican el funcionamiento y son fundamentales para el diseño de lagunas de estabilización.

De acuerdo a lo anterior, la pregunta problema del proyecto es la siguiente:

*¿Cuáles son los coeficientes cinéticos para el diseño de lagunas de estabilización en la industria alimentaria, ubicadas en la sabana de Bogotá?*

### **3. OBJETIVOS**

#### **3.1. GENERAL**

Determinar los coeficientes cinéticos en la operación de lagunas de estabilización de tratamiento de aguas residuales, del proceso industrial en Productos Ramo S.A.

#### **3.2. ESPECÍFICOS**

- Recopilar la información de resultados de análisis de aguas residuales provenientes del sistema de tratamiento lagunar.
- Analizar el funcionamiento actual de las lagunas de estabilización para el tratamiento de aguas residuales en la industria Productos Ramo S.A.
- Calcular el coeficiente cinético de remoción ( $K$ ), mediante el uso de las ecuaciones para mezcla completa, flujo pistón y flujo disperso.

#### 4. JUSTIFICACIÓN

La contaminación de los recursos hídricos en Colombia por vertimientos de aguas residuales, representa un problema de saneamiento público y ambiental, ya que estas son retornadas, en la mayoría de los casos, a los cuerpos de agua sin ningún tipo de tratamiento. Lo anterior, es el resultado de los bajos presupuestos que se destinan a obras de infraestructura de esta índole, por lo que es importante implementar mecanismos de tratamiento de aguas residuales, que se ajuste a las condiciones socioeconómicas de la población.

Por lo tanto, es importante recurrir al uso de mecanismos que requieran una reducida inversión, presenten bajos costos durante la operación y el mantenimiento; además de manejar altas eficiencias en la remoción de carga orgánica, tóxicos, coliformes fecales y sólidos suspendidos; como es el caso de sistemas con lagunas de estabilización<sup>16</sup>.

Por ser un sistema biológico, el comportamiento de las lagunas de estabilización depende de diversos factores como son: la temperatura, aeración, pH, clima, entre otros; que alteran los coeficientes de reacción (K), por lo que no es recomendable establecer un coeficiente teórico global. Por este motivo, lo ideal es determinarlos mediante estudios hechos en el lugar de aplicación del sistema lagunar; sin embargo, en Colombia se utilizan coeficientes determinados en países con características meteorológicas distintas.

Esta investigación se centra en la obtención de constantes cinéticas de remoción de la materia orgánica, empleadas en el diseño de lagunas de estabilización para el tratamiento de aguas residuales; ya que actualmente se utilizan coeficientes genéricos establecidos en sitios con condiciones climáticas diferentes, a las que se presentan en la Sabana de Bogotá y que pueden producir sobredimensionamiento de las lagunas, además de cambios en la eficiencia de diseño. Por lo anterior, resulta necesaria la determinación de constantes cinéticas de remoción que se adecúen a las características climáticas de la región.

---

<sup>16</sup> *Ibíd.*, p. 145.

## **5. ALCANCES Y LIMITACIONES**

### **5.1. ESPACIO**

El trabajo de investigación requirió la obtención de muestras del sistema lagunar, para el tratamiento de aguas residuales de tipo industrial de la compañía Productos Ramo S.A., la cual está ubicada en el municipio de Mosquera en Cundinamarca.

Además, para desarrollar el proyecto fue necesario contratar el servicio de un laboratorio ambiental externo, que contara con los equipos adecuados para determinar la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) y la Demanda Química de Oxígeno (DQO); necesarios para calcular las constantes de remoción, y que no fueron posibles de evaluar en los laboratorios de la Universidad Católica de Colombia.

### **5.2. TIEMPO**

El proyecto de investigación inicio el 20 de septiembre de 2017 y finalizo el 30 mayo de 2018. Sin embargo, se suspendió del 16 de diciembre al 15 de enero de 2018.

### **5.3. CONTENIDO**

El presente proyecto contiene el estudio de características físico-químicas y biológicas del sistema lagunar, para la determinación de los coeficientes cinéticos de remoción de la materia orgánica, utilizados en el diseño de lagunas de estabilización de tipo industrial; calculadas con base en modelos previamente establecidos por otros autores, para el diseño de este tipo de sistemas.

### **5.4. ALCANCE**

El alcance del presente proyecto es la determinación del coeficiente de remoción de DBO (K); a través de las ecuaciones de flujo pistón, mezcla completa y flujo disperso mediante la información obtenida en el sistema lagunar de Productos Ramo S.A.

## 6. MARCO DE REFERENCIA

### 6.1. MARCO TEÓRICO

#### 6.1.1. Tratamiento de Agua Residual.

El tratamiento de agua residual, explica Suematsu<sup>17</sup> (1995), se presenta como una solución a la contaminación de desechos líquidos que producen las poblaciones urbanas o rurales, además de las industrias. El tratamiento de agua residual es el conjunto de procesos físicos, químicos y/o biológicos unitarios, que tienen como fin la depuración de contaminantes en el agua proveniente del uso doméstico o industrial.

#### 6.1.2. Fases del Tratamiento de Aguas Residuales.

El tratamiento de aguas residuales, según Hammeken y Romero<sup>18</sup>, se conoce como el procedimiento unitario de descontaminación, donde se emplean procesos físicos, químicos y biológicos para limpiar poluciones en el agua. Para su tratamiento se requieren varios métodos que agrupan diferentes procesos para facilitar su implementación, y se dividen en tratamiento primario, secundario y terciario (o avanzado).

Para Hammeken y Romero<sup>19</sup>, el tratamiento secundario hace referencia al tratamiento biológico y químico, los cuales se emplean para reducir la cantidad de materia orgánica contenida, en donde se utilizan sistemas como las lagunas de estabilización o los lodos activados; aquí también se puede evidenciar eliminación de patógenos que producen enfermedades al ser humano.

#### 6.1.3. Tratamiento Biológico.

El tratamiento biológico para aguas residuales según Orozco<sup>20</sup>, se basa en medidas de DBO y DQO que reflejan la cantidad de materia orgánica contenida por el efluente, además de utilizarse como interpretaciones cinéticas del proceso biológico que ocurre en el tratamiento de agua residual. Estas medidas buscan calcular la cantidad de oxígeno requerido para remover la materia orgánica, en donde la DBO se encarga del cálculo de oxidación de materia orgánica biodegradable, mientras que la DQO se encarga de la no biodegradable.

---

<sup>17</sup> SUEMATSU, Guillermo León. Texto [en línea]. Aspectos generales y principios básicos de los sistemas de lagunas de estabilización. Programa de tratamiento de Aguas Residuales. Cali. Julio de 1995. [Citado el: 28 de agosto de 2017.] Disponible en Internet: <<http://www.bvsde.ops-oms.org/bvsair/e/repindex/rep157/sil/sil.html>>

<sup>18</sup> HAMMEKEN, Alejandro y ROMERO, Eduardo. Análisis de una PTAR [en línea]. Puebla: Universidad de las Américas Puebla [citado 30 agosto, 2017]. Disponible en Internet.

<sup>19</sup> *Ibíd.*, p 24

<sup>20</sup> OROZCO, Álvaro. Bioingeniería de Aguas Residuales. 1 ed. Bogotá: Asociación Colombiana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, 2005. p. 31.

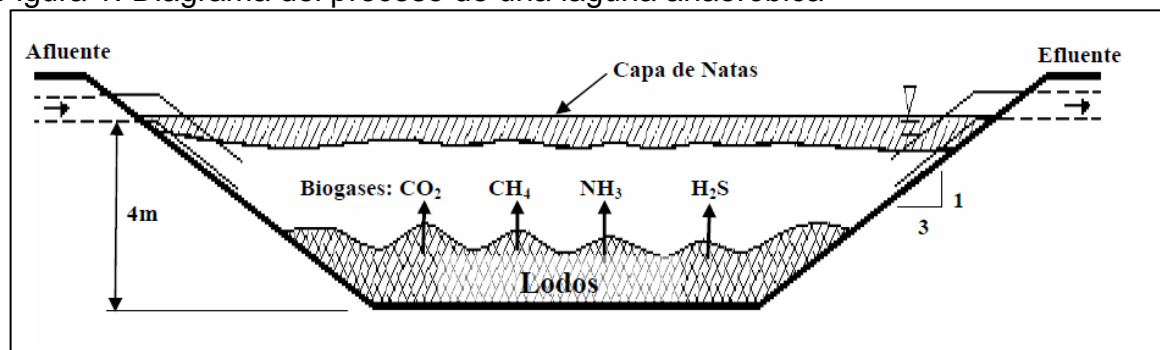
#### 6.1.4. Lagunas de estabilización.

Según Moreno<sup>21</sup>, el tratamiento de aguas residuales mediante sistemas lagunares, se realiza a través del estancamiento de las aguas por un periodo de tiempo variable, que depende de las condiciones climáticas del sitio de colocación y de la carga orgánica a la cual va a estar sometida. "La finalidad del proceso es entregar un efluente con características establecidas de Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), Demanda Química de Oxígeno (DQO), Oxígeno Disuelto (OD), Sólidos Suspendedos (SS), entre otros."<sup>22</sup> Según el contenido de oxígeno las lagunas se pueden clasificar en lagunas anaerobias, aerobias, facultativas y de maduración.

#### 6.1.5. Lagunas Anaerobias.

Moreno<sup>23</sup> explica que las lagunas anaerobias se caracterizan por tener altos índices de carga orgánica y de cortos periodos de retención de las aguas; además, muestra bajos o nulos contenidos de oxígeno disuelto (OD) en diferentes periodos de tiempo. Al poseer cargas orgánicas altas no se encuentra una zona aeróbica, excepto en la superficie, la cual es despreciable. Son comúnmente usadas como la primera línea en un sistema lagunar en aguas industriales con DBO mayor a 1000 mg/l.

Figura 1. Diagrama del proceso de una laguna anaeróbica



Fuente: Oakley, Stewar. Lagunas de Estabilización en Honduras, 2005.

A continuación se encuentran las principales expresiones matemáticas, usadas para el diseño de lagunas anaerobias:

<sup>21</sup> MORENO, María. Depuración por lagunaje de aguas residuales, Manual de operadores. Madrid. Ministerio de obras públicas y transporte, 1991. p.29.

<sup>22</sup> Yáñez, Fabián. Lagunas de estabilización. Op. Cit., p.9.

<sup>23</sup> MORENO, María. Op. Cit. p .55.

### 6.1.5.1. Correlación Sudafricana.

La primera expresión matemática que es propuesta es la correlación sudafricana, la cual ha sido desarrollada para climas tropicales y subtropicales asumiendo una temperatura de 22 °C para el afluente, como muestra Yáñez<sup>24</sup>.

$$S = \frac{S_a}{K_n \text{ TRH} \left(\frac{S}{S_a}\right)^n + 1}$$

Ecuación 1.  
Correlación  
sudafricana

Donde:

S: DBO<sub>5</sub> del efluente de la laguna anaerobia, en mg/L

S<sub>a</sub>: DBO<sub>5</sub> del afluente de la laguna anaerobia, en mg/L

K<sub>n</sub>: Constante de degradación asumiendo mezcla completa, en 1/ días

TRH: Periodo de retención nominal (TRH = V/Q), en días

n: Exponente determinado experimentalmente

$$\text{PR} = (S/S_a - 1)(S/S_a)^n / K_n$$

Ecuación 2.  
Periodo de retención  
nominal, correlación  
sudafricana

### 6.1.5.2. Modelo de Mezcla Completa para lagunas anaerobias

$$K' = (S/S_a)^n K_n$$

Ecuación 3.  
Modelo de mezcla  
completa, lagunas  
anaerobias

Donde:

K': Coeficiente de degradación global de DBO en una laguna aeróbica, en 1/días

### 6.1.5.3. Modelo de Vincent

$$S = \frac{S_a}{\left(\frac{S}{S_a}\right)^n K\theta + 1}$$

Ecuación 4.  
Modelo de Vincent

Dónde:

S: DBO del efluente y de la laguna, mg/L

---

<sup>24</sup> Yáñez, Fabián. Lagunas de estabilización. Op. Cit., p.69.



$S_a$ : DBO del afluente, mg/L  
 $K$ : Constante de reacción de DBO, días<sup>-1</sup>  
 $\theta$ : Tiempo de retención en el reactor, días  
 $n$ : exponente, igual a 4.8

#### 6.1.5.4. Modelo empírico en función de la temperatura.

Las recomendaciones generales de Mara y Pearson se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 1. Criterios de diseño para lagunas anaerobias en función de la temperatura

TEMPERATURA (°C)	CARGA VOLUMÉTRICA (g/m <sup>3</sup> - día)	REMOCIÓN DE DBO (%)
<10	100	40
- 20	20T-100	2T+20
>20	300	60

Fuente: CONAGUA. Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento, 2007.

#### 6.1.5.5. Diseño basado en la carga volumétrica.

Calculando la carga orgánica volumétrica usando la ecuación 5 y la tabla 2.

$$V = \frac{DBO_i * Q}{COV}$$

Ecuación 5.  
Carga orgánica volumétrica

Donde:

V = Volumen de la laguna, m<sup>3</sup>

DBO<sub>i</sub>: la concentración inicial de DBO en el afluente, mg/L

Q: Caudal, m<sup>3</sup>/día

COV: Carga orgánica volumétrica de DBO, g/m<sup>3</sup>- día

Tabla 2. Relación entre los parámetros en lagunas anaeróbicas.

TEMPERATURA (°C)	TRH (días)	REMOCIÓN DE DBO (%)
10-15	4-5	30-40
15-20	2-3	40-50
20-25	1-2	50-60
25-30	1-2	60-80

Fuente: Oakley, Stewar. Lagunas de Estabilización en Honduras, 2005.

### 6.1.6. Lagunas Aerobias.

También llamadas lagunas de alta producción de biomasa, la Comisión Nacional del Agua (México)<sup>25</sup> explica que tienen profundidades entre 0.3 m y 0.45 m y la reducción de la materia orgánica es realizada por organismos aeróbicos. Este tipo de lagunas ha tenido buenos resultados en climas cálidos y con alta radiación solar, para la producción de cosecha de algas; sin embargo, su uso en el tratamiento de aguas residuales no es generalizado. La ecuación para hallar la DBO es:

$$y = L(1 - e^{-K\theta}) = L(1 - 10^{-K\theta})$$

Ecuación 6.  
Determinación  
de DBO

Donde:

y: DBO ejercida por el agua después de un tiempo t, mg/L

L: DBOUC, mg/L, o DBO remanente del agua para t = 0

K: constante de velocidad de reacción de la DBO, base natural, días<sup>-1</sup>

θ: tiempo de reacción, días.

### 6.1.7. Lagunas Facultativas.

Según Polprasert <sup>26</sup>, las lagunas de este tipo se caracterizan principalmente por el comensalismo entre algas y bacterias en el estrato superior y la descomposición de los sólidos sedimentados en el fondo.

Además, Moreno<sup>27</sup> asegura que la degradación de la materia orgánica se realiza en condiciones aerobias y anaerobias. Las primeras se mantienen en el estrato superior de la laguna mientras que, en el inferior, se realiza la degradación anaerobia en ausencia de oxígeno. La demanda de oxígeno es muy alta en estas lagunas, debido a que un alto contenido de este acelera la descomposición de materia orgánica, pero a su vez fundamenta la aparición de organismos anaeróbicos.

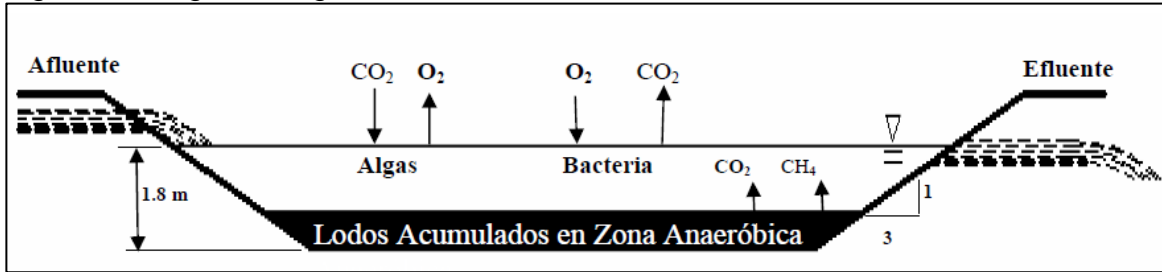
---

<sup>25</sup> COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA. Manual de Agua Potable Alcantarillado y Saneamiento: Diseño de lagunas de estabilización. CNA. México. D.F., 2007. p.7.

<sup>26</sup> POLPRASERT, C. Significance of biofilm activity in facultative pond design and performance. En: Water Science and Technology.1995. Vol. 31, no. 12, p. 119–128.

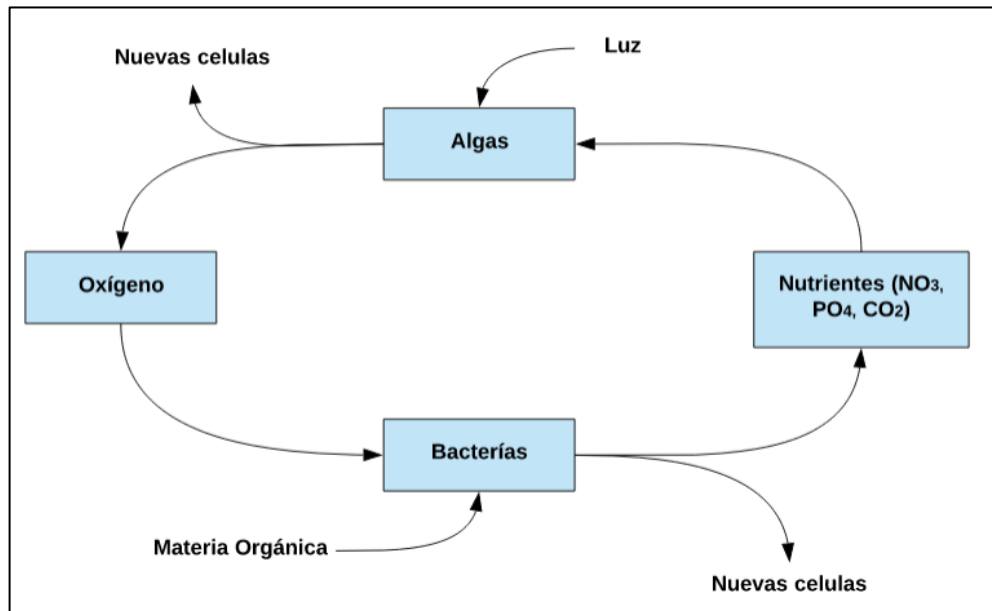
<sup>27</sup> MORENO, Maria. Op. cit., 65 y 66.

Figura 2. Diagrama laguna facultativa



Fuente: Oakley, Stewar. Lagunas de Estabilización en Honduras, 2005.

Figura 3. Representación esquemática de la actividad de algas y bacterias en lagunas facultativas.



Fuente: Moreno, María. Ministerio de obras públicas y transporte, 1991.

A continuación, se encuentran las principales expresiones matemáticas, usadas en el diseño de lagunas facultativas:

### 6.1.7.1. Modelos cinéticos de remoción

➤ **Modelo de mezcla completa y cinética de primer orden.**

$$C = \frac{C_o}{1 + K\theta}$$

Ecuación 7.  
Mezcla completa y  
Cinética de primer

orden

Donde:

$C_o$ : Concentración de DBO en el afluente, mg/L

$C$ : Concentración de DBO en el efluente, mg/L

$K$ : Constante de reacción de primer orden para remoción de DBO, días<sup>-1</sup>

$\theta$ : Tiempo de retención en el reactor, días

➤ **Modelo de flujo arbitrario.**

Según Romero<sup>28</sup>, es usada para un modelo no ideal que combina tanto el flujo de mezcla completa como el flujo pistón.

$$\frac{C}{C_o} = \frac{4ae^{\left(\frac{1}{2d}\right)}}{(1+a)^2 e^{\left(\frac{a}{2d}\right)} - (1-a)^2 e^{\left(\frac{-a}{2d}\right)}}$$

Ecuación 8.  
Flujo arbitrario

En la que:

$$a = \sqrt{1 + 4K\theta d}$$

Ecuación 9.  
Constante a

Para el cálculo del número de dispersión ( $d$ ), se emplean las ecuaciones de Polprasert y la de Sáenz. Las cuales se ven a continuación:

$$d = \frac{0.184[\theta v(W + 2Z)]^{0.489} W^{1.511}}{(LZ)^{1.489}}$$

Ecuación 10.  
Número de  
dispersión según  
Polprasert

$$d = \frac{1.158[\theta(W + 2D)]^{0.489} W^{1.511}}{(T + 42.5)^{0.734} (LD)^{1.489}}$$

Ecuación 11.  
Número de  
dispersión según  
Sáenz

Donde:

$C$ : Concentración del efluente, mg/L

$C_o$ : Concentración del afluente, mg/L

$K$ : Constante de reacción de primer orden, días<sup>-1</sup>

$\theta$ : Tiempo de retención en el reactor, días

$d$ : número de dispersión del flujo, adimensional.

---

<sup>28</sup> ROMERO, Lagunas de estabilización. Op. cit., p.155-157.

v: Viscosidad cinemática, m<sup>2</sup>/s  
 W: Ancho de la laguna, metros  
 Z y D: Profundidad del agua en la laguna, metros  
 L: Longitud entre el afluente y el efluente, metros  
 T: Temperatura de la laguna; °C

➤ **Modelo de flujo pistón.**

$$S = S_a e^{-K\theta}$$

Ecuación 12.  
 Modelo de flujo pistón

Donde:

S<sub>a</sub>: DBO afluente, mg/L

S: DBO efluente, mg/L

K: Coeficiente de remoción de DBO a la temperatura del líquido.

θ: Tiempo de retención hidráulica, días

**6.1.7.2. Modelos semiempíricos**

La Comisión Nacional del Agua<sup>29</sup> asegura que estos modelos combinan conceptos teóricos de carga orgánica e hidráulica, con los resultados obtenidos del análisis de plantas pilotos. Ejemplo esto, son las expresiones halladas por Marais y Gloyna, como se muestra a continuación:

➤ **Marais**

$$K = 1,2 * 1,085^{T-35}$$

Ecuación 13.  
 Modelo semiempírico  
 de Marais

➤ **Gloyna**

$$K = 0,8 * 1,084^{T-20}$$

Ecuación 14.  
 Modelo semiempírico  
 de Gloyna

**6.1.8. Lagunas de Maduración.**

Para Moreno<sup>30</sup>, las lagunas de maduración se utilizan como última fase de tratamiento de un conjunto de lagunas de estabilización, que en muchas ocasiones es precedida por una laguna anaerobia y una o más lagunas

<sup>29</sup> COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA. Manual de Agua Potable Alcantarillado y Saneamiento: Diseño de lagunas de estabilización. Op. cit., 55

<sup>30</sup> MORENO, Depuración por lagunaje de aguas residuales: manual de operadores, Op.cit., 89.

facultativas; o como la laguna final de otro sistema de tratamiento, como reactores UASB. Además, Dahl<sup>31</sup> señala que este tipo de lagunas tiene como objetivo reducir el carbono, nutrientes y patógenos en las últimas etapas del tratamiento de aguas residuales.

Además, se construyen con tiempos de retención aproximadamente de 3 a 10 días cada una, ya que se pueden encontrar una o más en un sistema lagunar, con una profundidad de 1 a 1,5 metros.

### 6.1.9. Patrones de Flujo Hidráulico

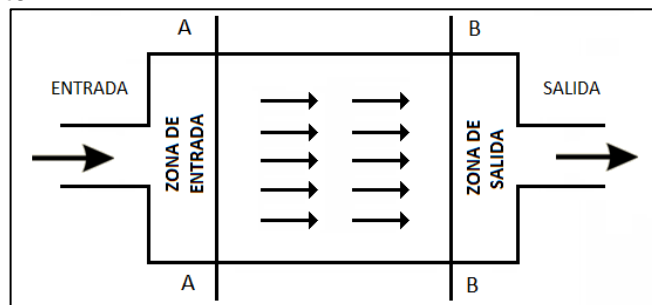
#### 6.1.9.1. Mezcla Completa.

Según la Comisión Nacional del Agua (México)<sup>32</sup>, este patrón de flujo ideal considera que la concentración de los sustratos y microorganismos es la misma en cualquier parte del reactor, y para lograr este sistema de mezclado es necesario garantizar que no haya zonas muertas. La cinética de remoción de DBO se expresa como se muestra en la Ecuación 7.

#### 6.1.9.2. Flujo Pistón.

También llamado reactor tubular, para la Comisión Nacional del Agua (México)<sup>33</sup> “es aquel en el que no hay mezclado en la dirección del flujo, pero si existe un mezclado completo en la dirección perpendicular al mismo, esto es, en la dirección radial”. Este tipo de reactor se caracteriza porque el ingreso y salida del agua es constante, así como el tiempo de retención hidráulico es corto. La cinética de remoción de DBO se expresa en la Ecuación 12.

Figura 4. Flujo pistón



Fuente: Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento, México, 2007.

<sup>31</sup> DAHL, N. WOODFIELD, P. A practical model for sunlight disinfection of a subtropical maturation pond. En: Water Research. Enero, 1995. Vol. 108., p. 151-159.

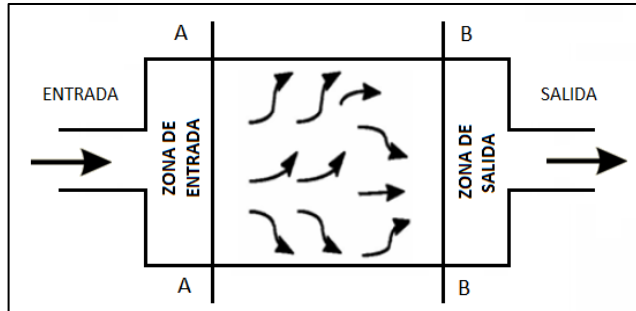
<sup>32</sup> COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA, Manual de Agua Potable Alcantarillado y Saneamiento: Diseño de lagunas de estabilización. Op. cit., 20

<sup>33</sup> *Ibíd.*, p. 21.

### 6.1.9.3. Flujo Disperso

Es la variación del flujo tipo pistón, según lo explica la Comisión Nacional del Agua (México)<sup>34</sup>; en el que las partículas del flujo no se mezclan, sino que siguen trayectorias separadas a través del reactor, lo que ocasiona que cada elemento tenga tiempos de retención diferentes.

Figura 5. Flujo disperso



Fuente: Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento, México.

### 6.1.10. Factores que modifican el funcionamiento de las lagunas de estabilización

#### 6.1.10.1. Vientos

El viento puede ser un beneficio según lo explica Rolim<sup>35</sup>, gracias a la oxigenación que provee el aire al agua, haciendo que todos los microorganismos que ejercen la descomposición de materia orgánica se distribuyan a lo largo y ancho de la laguna; además la introducción del aire, favorece al sustento de microorganismos en caso de que las algas sufran algún tipo de déficit en la producción de oxígeno.

#### 6.1.10.2. Temperatura

Rolim<sup>36</sup> señala que las reacciones de fotosíntesis por parte de las algas y del proceso de oxidación de los microorganismos, depende de la temperatura del lugar donde se plantee la laguna. Los cambios bruscos de temperatura pueden ocasionar la alteración del ciclo que permite la depuración de aguas residuales.

<sup>34</sup> Ibid., p. 21.

<sup>35</sup> ROLIM, Sergio. Sistemas de Lagunas de Estabilización. 4 ed. Bogotá: McGraw-Hill Interamericana, 2000. p.69.

<sup>36</sup> Ibid., p. 70.

#### **6.1.10.3. Precipitaciones pluviales**

Las precipitaciones afectan de cierta manera el funcionamiento en periodos largos de lluvia según Rolim<sup>37</sup>, ya que para funcionar necesita de bajas alturas en el espejo de agua. Debido a lo anterior, el aumento en dichas profundidades afecta el periodo de retención para un óptimo funcionamiento, y además, ocasiona la dilución del contenido de la laguna, por lo que en estos casos es recomendable la reducción del tiempo de retención.

#### **6.1.10.4. Radiación Solar**

Rolim<sup>38</sup> asegura que la radiación solar afecta el debido funcionamiento de lagunas facultativas y aerobias, gracias a que provee luz solar para el proceso de fotosíntesis en las algas, produciendo un equilibrio en la laguna con respecto a la producción de oxígeno y de dióxido de carbono.

#### **6.1.10.5. Valor del pH**

“El uso factible de carbono, a partir del ion bicarbonato y la producción de ion OH-, hace que se obtengan periodos de pH altos en las lagunas facultativas y aerobias. Durante las últimas horas diurnas, se pueden observar valores de pH superiores a nueve<sup>39</sup>”. En consecuencia, de un registro alto de pH se presenta una baja actividad bacteriana, reduciendo la producción de CO<sub>2</sub> así como el proceso simbiótico de las algas. Para Romero<sup>40</sup>, dicha elevación del pH refleja una tasa de mortalidad bacteriana alta.

#### **6.1.10.6. Materiales tóxicos**

El funcionamiento de la laguna puede ser afectado por compuestos adyacentes contenidos en el agua, como lo menciona Romero<sup>41</sup>; ya que el conjunto de organismos vivos que la habitan son susceptibles a la existencia de sulfuros, entre otros metales pesados, en donde las más afectadas son las algas.

#### **6.1.10.7. Oxígeno disuelto.**

El contenido de oxígeno disuelto según Orozco<sup>42</sup>, es fundamental para aquellos microorganismos contenidos en las lagunas que dependen de él para sobrevivir, como las lagunas aeróbicas y las facultativas, ya que las algas lo utilizan para el proceso metabólico de obtención de energía y efectuar su reproducción; además, en aguas residuales es un indicativo de contaminación del agua residual debido al consumo de oxígeno disuelto de la materia orgánica.

---

<sup>37</sup> Ibid., p. 70.

<sup>38</sup> Ibid., p. 21.

<sup>39</sup> ROMERO, Lagunas de estabilización, Op. cit., p.129.

<sup>40</sup> Ibid., p.129

<sup>41</sup> Ibid., p.140.

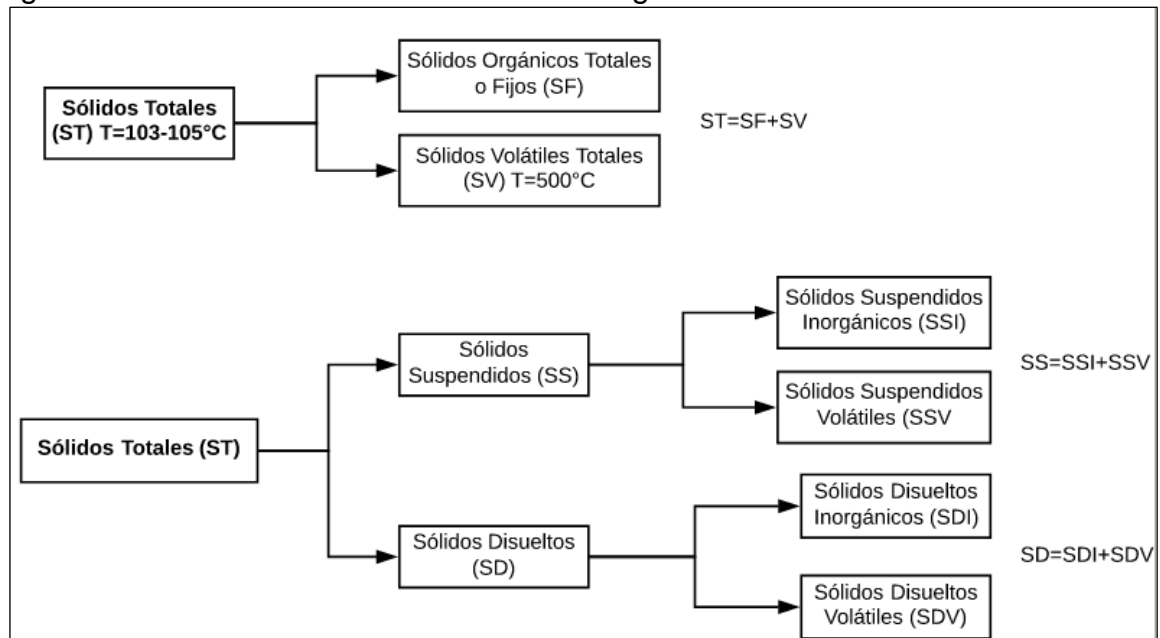
<sup>42</sup> OROZCO, Op. cit., p .11.



### 6.1.10.8. Sólidos suspendidos.

Los sólidos suspendidos, explica Orozco<sup>43</sup>, es un parámetro de gran importancia debido a que su presencia en el agua residual representa la materia orgánica que generalmente se forma de partículas en suspensión, más conocidas como sólidos suspendidos volátiles, los cuales forman parte de los sólidos suspendidos totales, como los sólidos suspendidos o los sólidos disueltos.

Figura 6. Clasificación de los sólidos en las aguas residuales



Fuente: OROZCO, Álvaro. Bioingeniería de Aguas Residuales. 1 ed. Bogotá: Asociación Colombiana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, 2005. p .20.

## 6.2. MARCO CONCEPTUAL

Según la Resolución 0330 de 2017<sup>44</sup>, el tratamiento biológico o tratamiento secundario, es aquel proceso que tiene como objetivo la eliminación de los contaminantes presentes en el agua, utilizando la acción natural de los microorganismos (bacterias, protozoos y algas), para reducir la materia orgánica en condiciones anaerobias y/o aerobias.

Asimismo, se entiende por materia orgánica a la cantidad de contaminantes que contiene el agua residual, y que es el alimento (sustrato) de las bacterias o

<sup>43</sup> OROZCO, Op. cit., 19.

<sup>44</sup> MINISTERIO DE VIVIENDA CIUDAD Y TERRITORIO. Resolución 0330 de 2017, Bogotá, Ministerio de vivienda ciudad y territorio 2017, p. 124.

biomasa que están presentes en el agua; las cuales se encargan de hacer la depuración o limpieza de la misma mediante la remoción de materia orgánica biodegradable. Esta es medida por medio de los parámetros de demanda bioquímica de oxígeno y química de oxígeno.

La demanda bioquímica de oxígeno (DBO), es la cantidad de oxígeno que se requiere para que la materia orgánica rápidamente biodegradable sea depurada biológicamente, es decir, mediante microorganismos<sup>45</sup>. Por otra parte según Romero<sup>46</sup>, la demanda química de oxígeno (DQO), representa la cantidad de oxígeno necesario para lograr que la materia orgánica oxidable se degrade químicamente, mediante la adición de una sustancia oxidante fuerte. La relación DQO/DBO es un indicador de la biodegradabilidad del tratamiento, es decir, que tan susceptible es la fuente de agua residual a ser depurada mediante un sistema de tratamiento biológico. Esta relación nos indica los procesos unitarios (químicos o biológicos) que garantizan que la remoción de carga orgánica se realice de manera eficiente.

El valor obtenido de DBO en el afluente, permite determinar la carga orgánica (CO), la carga orgánica superficial (COS) y la carga orgánica volumétrica (COV). Según La Comisión Nacional del Agua<sup>47</sup>, la primera se define como la materia orgánica medida en términos de DBO o DQO, que es tratada por el sistema de lagunas. Se calcula mediante la siguiente expresión:

$$C_o = \frac{S_i}{Q} \quad \text{Ecuación 15. Carga orgánica}$$

Donde:

$C_o$ : Carga orgánica, kg de DBO

$S_a$ : DBO en el afluente, mg/L

$Q$ : Caudal, m<sup>3</sup>/ día

Asimismo, Según la Comisión Nacional Del Agua<sup>48</sup>, la carga orgánica superficial (COS), es la cantidad de materia orgánica que trata el sistema de lagunas en una unidad de área superficial, la cual se calcula mediante la ecuación 14:

---

<sup>45</sup> ASSUMPTION UNIVERSITY OF THAILAND. Design and Performance Evaluation of a Wastewater Treatment Unit. [en línea]. Thailand. [citado 10 Septiembre, 2017]. Disponible en Internet : < URL:[http://www.journal.au.edu/au techno/2006/jan06/vol9num3\\_article11.pdf](http://www.journal.au.edu/au techno/2006/jan06/vol9num3_article11.pdf)>

<sup>46</sup> ROMERO, Lagunas de estabilización de tratamiento de aguas residuales, Op. cit., 27.

<sup>47</sup> COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA, Manual de Agua Potable Alcantarillado y Saneamiento: Diseño de lagunas de estabilización. Op. cit., 38.

<sup>48</sup> *Ibíd.*, p. 24.

$$\text{COS} = \frac{S_a Q}{A}$$

Ecuación 16.  
Carga orgánica  
superficial

Donde:

COS: Carga orgánica superficial, kg DBO/ m<sup>2</sup> - día

S<sub>a</sub>: concentración de la DBO en el afluente, mg/L

Q: Caudal, m<sup>3</sup>/día

A: Área superficial de la laguna, m<sup>2</sup>

Además, la carga orgánica volumétrica es la cantidad de materia orgánica aplicada a la laguna en una unidad de volumen; su ecuación es:

$$\text{COV} = \frac{S_a Q}{V}$$

Ecuación 17.  
Carga orgánica  
volumétrica

Donde:

COV: Carga orgánica volumétrica, kg DBO/ m<sup>3</sup> - día

S<sub>a</sub>: concentración de la DBO en el afluente, mg/L

Q: Caudal, m<sup>3</sup>/día

V: Volumen de la laguna, m<sup>3</sup>

Las anteriores expresiones son importantes para el diseño de un sistema biológico, ya que permiten disminuir la carga proveniente del efluente, y de esta manera garantizar un afluente, cuyas características a nivel químico sean menores o iguales a las emitidas por la ley.

Otro de los parámetros de diseño es el tiempo de detención o retención hidráulica definida por CONAGUA<sup>49</sup>, como el tiempo necesario para que el sistema de tratamiento biológico realice una determinada remoción de carga orgánica. Es una relación entre el volumen y el caudal.

$$\theta = \frac{V}{Q}$$

Ecuación 18.  
Tiempo de  
retención

Donde:

---

<sup>49</sup> *Ibíd.*, p. 37.

$\theta$ : Tiempo hidráulico de retención, días

V: Volumen de la laguna, m<sup>3</sup>

Q: Caudal, m<sup>3</sup>/día

Por otra parte, la biomasa es el conjunto de microorganismos, materia orgánica y material inerte. Según Romero<sup>50</sup>, estos microorganismos cuentan con un periodo de vida específico, por lo que hacen la reposición de los mismos, mediante la subdivisión de otra célula viva que al final genera dos nuevas células; a este proceso se le conoce como división binaria.

Monod<sup>51</sup> establece que existen 6 fases durante el ciclo de vida de una célula:

- Fase de aclimatación: Las células al ser cambiadas de medio requieren de un tiempo para adaptarse, por lo que no hay crecimiento celular y el periodo de generación es extenso. Cuando el medio de inoculación y el actual son los mismos, esta fase es reducida o no ocurre.
- Fase de aceleración: Comienza a aumentar el crecimiento y a disminuir la generación.
- Fase exponencial o logarítmica: El crecimiento bacterial está en el punto máximo, pero el periodo de generación es mínimo. En esta fase se crean reservas de alimento.
- Fase declinante: Se da debido a que el sustrato (alimento) o un nutriente en particular empieza a agotarse, por lo que el crecimiento disminuye y el tiempo de generación aumenta.
- Fase estacionaria: Se agota el sustrato, por lo tanto, el crecimiento se detiene.
- Fase endógena: “presenta metabolismo endógeno y una tasa de mortalidad alta”. El metabolismo endógeno se da cuando la célula utiliza las reservas de alimento para subsistir, pero sin llegar a reproducirse; al agotarse la reserva, la célula se autodestruye.

---

<sup>50</sup> ROMERO, Jairo. Tratamiento de Agua Residuales. 3 ed. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería, 2000. p.201.

<sup>51</sup> ROMERO, Lagunas de tratamiento de aguas residuales, Op. cit., 202.

Los microorganismos que se desarrollan en las lagunas de estabilización, varían según el tipo de condiciones que se presenten en la laguna. Bacterias anaeróbicas, aeróbicas, y aquellos que reúnen las características de las dos anteriores, son la base fundamental de la degradación, descomposición y estabilización de la materia orgánica; sin embargo, otros organismos que habitan en aguas residuales domésticas y residuales, pueden originar problemas sanitarios graves. Entre los microorganismos que componen el ecosistema en las lagunas de estabilización están las bacterias, protozoos y algas.

Además para Valera<sup>52</sup>, los principales microorganismos que oxidan y estabilizan la materia orgánica en las lagunas de estabilización son las bacterias, que según el hábitat donde se encuentren realizan un proceso determinado. En las lagunas anaerobias, las bacterias requieren de energía, carbono y compuestos orgánicos complejos e insolubles en agua; los cuales por medio de hidrólisis se convierten en compuestos más simples. Estos serán utilizados por otro tipo de bacterias en un proceso denominado fermentación ácida, en donde se forman ácidos butíricos o propiónicos; finalmente estos ácidos se convertirán en metano y dióxido de carbono. Este último a su vez formará parte de la fotosíntesis algal, que se presenta en lagunas facultativas predominantemente.

Otro proceso presente en la reducción de la concentración de materia orgánica, como explica Gil-Rodríguez<sup>53</sup>, es la nitrificación donde organismos autótrofos (Nitrosococcus, Nitrospira, Nitrosogloea y Nitrosomonas) se encargan de la oxidación del amonio hasta Nitrito; estos a su vez son oxidados a nitratos por Nitrocistes, y Nitrobacter. Como resultado de este proceso se genera energía y materias primas que se utilizan en la formación de moléculas compuestas, que posteriormente harán parte de proteínas, polisacáridos entre otros.

Según Correa<sup>54</sup> en lagunas facultativas, las bacterias se enfocan en la degradación de materia orgánica por oxidación, con el fin de producir energía, dióxido de carbono y más bacterias, como se mencionaba anteriormente. El dióxido de carbono es utilizado por las algas en su proceso de fotosíntesis, para producir oxígeno, que será utilizado a su vez por las bacterias. Es así como

---

<sup>52</sup> VARELA, Gustavo. Fisiología y metabolismo bacteriano. CEFA, 2002. Consultado 13 de abril de 2018. P.43.

<sup>53</sup> GIL-RODRIGUEZ, Manuel. Eliminación biológica de amonio y materia orgánica, {En línea}, Revista internacional de métodos numéricos para el cálculo y diseño en ingeniería, Vol. 22,4 (2006) p. 427-436. Disponible en línea: <<https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099/4771/22N4E.pdf>>.

<sup>54</sup> CORREA, Gloria. Evaluación y monitoreo del sistema de lagunas de estabilización del municipio de Santa fé de Antioquia, Colombia. {En línea}, Medellín, 2008, Consultado: 15 de abril de 2018, p.15. Trabajo de investigación (magíster en ingeniería). Universidad de Antioquia. Facultad de ingeniería. Disponible en <<http://tesis.udea.edu.co/bitstream/10495/50/1/EvalMonitStmaLagunasStfeAnt.pdf>>.

bacterias y algas trabajan conjuntamente, con el fin de realizar el proceso de degradación y estabilización de la materia orgánica.

Para que en las lagunas se presente un adecuado funcionamiento, debe garantizarse la disponibilidad de nutrientes, de carbono y de carga orgánica. Es así como el estudio de degradabilidad se centra en la capacidad que tienen las bacterias de realizar procesos metabólicos. Lo anterior se ve reflejado en el concepto de cinética de remoción, en donde se determina la tasa a la que dichas bacterias realizan tanto el proceso catabólico como anabólico, para asimilar la materia orgánica proveniente del efluente.

### **6.3. MARCO HISTÓRICO**

La purificación natural de cuerpos de agua según Vitko<sup>55</sup>, es un proceso biológico que la naturaleza ha desarrollado desde tiempos remotos. Ejemplo de esto, es la utilización que se le daba en Asia a las descargas de aguas servidas para criar peces, sin embargo, no se empleó con un fundamento técnico para la descontaminación de agua. Este enfoque se desarrolló en la segunda mitad del siglo XX, de la mano de autores como Marais y Gloyna, aunque limitado por la escasez de procesos para el pretratamiento de aguas.

Para Saénz<sup>56</sup>, a medida que las industrias y ciudades fueron creciendo, también se hizo notable la contaminación de los cuerpos de agua; creando problemas epidemiológicos, ecológicos y de reúso de aguas. Es así como fue surgiendo la necesidad de depurar las aguas residuales, provenientes de las grandes urbes y la preocupación de potabilizar el agua que dichas consumían. Sin embargo, la tecnología empleada solo se centraba en la clarificación y desinfección de aguas residuales, y no fue hasta mediados del siglo XX que los ingenieros sanitarios y técnicos encargados, se interesaron en las lagunas como reactores naturales para la estabilización de aguas residuales.

Lothar<sup>57</sup> afirma que el registro de acercamientos de la industria a este tipo de tratamiento, data del año 1911 en Inglaterra. Donde se encontraron descripciones

---

<sup>55</sup> VITKO, Tadeo G. Guía para el manejo de lagunas de estabilización. Lima. Centro Panamericano de ingeniería sanitaria y ciencias del ambiente, 1984. p.1. [citado el 3 de septiembre de 2017] Disponible en: <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/scan2/018706/018706.pdf>

<sup>56</sup> SAÉNZ, Rodolfo. Lagunas de estabilización y otros sistemas de simplificados para el tratamiento de aguas residuales. [Lima]. CEPIS, 1985.p.6-7.

<sup>57</sup> LOTHAR, Max. Curso para ingenieros sobre operación y mantenimiento de lagunas para estabilización de aguas residuales: Lagunas para el tratamiento de desechos industriales. Lima: Proyecto de desarrollo tecnológico de las instituciones de abastecimiento de agua potable y alcantarillado (DTIAPA), 1980. p.1.

que hacían alusión a “estanques de acumulación”, “estanques de purificación”, “estanques para retención de lodos” y otros; pero en los cuales no se registra ningún tipo de diseño o cálculo, al ser construidos aleatoriamente.

Como Vitko<sup>58</sup> menciona, el primer registro de la utilización de medios naturales para el saneamiento de aguas, es del año 1901 en la ciudad de San Antonio (Texas), en donde se vertían las aguas servidas en un pequeño lago. Luego en la localidad de Fessenden (Dakota del Norte), se instaló una nueva red de alcantarillado que no pudo ser tratada con métodos convencionales, por lo que se vieron en la necesidad de desviar el agua hacia un estanque ubicado en las afueras de la población. Después de varios meses los funcionarios del estado y del municipio inspeccionaron el depósito, quedando sorprendidos al ver que dichas aguas habían adquirido un grado de purificación.<sup>59</sup> Posteriormente a mediados del siglo XX, se diseña la primera laguna de estabilización exclusivamente para fines de tratamiento en Maddock (Dakota del norte); la cual fue estudiada por el servicio de salud pública de los Estados Unidos, obteniendo resultados favorables.

En América latina, se tiene registro de lagunas para retener desechos provenientes de establos desde el siglo pasado; sin embargo, no fue sino hasta 1957 que en Costa Rica se diseñó el primer sistema lagunar para la estabilización de aguas residuales en la ciudad Las Cañas en la provincia de Guanacaste, la cual contaba con una población de 2500 habitantes. En 1958, en la ciudad de Chitré en Ciudad de Panamá, se construyó una laguna para tratar las aguas residuales de esa ciudad; lastimosamente hubo ciertos problemas con el llenado de esa laguna. Además, en 1960 se construyeron en las ciudades de Lima (Perú) y San José Dos Campos (Brasil) lagunas con el mismo fin. Según un estudio realizado por el CEPIS en 1970, se comprobó que en América latina existían para ese momento 181 lagunas de estabilización en operación, y más tarde en 1978, el mismo CEPIS afirmó que el empleo de lagunas de estabilización había crecido hasta 561.

#### **6.4. MARCO LEGAL**

El Marco legal relacionado con la presente investigación se presenta a continuación:

---

[citado el 3 de septiembre de 2017] Disponible en: <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/scan2/011634/011634-II-01.pdf>

<sup>58</sup> VITKO. Op. Cit., 2.

<sup>59</sup> SAÉNZ. Op. cit., 8.

Tabla 3. Marco Legal

NORMATIVIDAD	DESCRIPCIÓN
Resolución 0330 de 2017	<p>Reglamenta los requisitos técnicos que se deben cumplir en las etapas de diseño, construcción, puesta en marcha, operación, mantenimiento y rehabilitación de la infraestructura relacionada con los servicios públicos de acueducto, alcantarillado y aseo. Así como a los diseños, ejecución de obras, operación y mantenimiento de obras, instalaciones o sistemas propios del sector de agua y saneamiento básico.</p> <p>“Por la cual se adopta el Reglamento Técnico para el Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico – RAS y se derogan las resoluciones 1096 de 2000, 0424 de 2001, 0668 de 2003, 1459 de 2005, 1447 de 2005 y 2320 de 2009”.</p>
Decreto 1076 de 2015	Expedido el 26 de mayo de 2015, para establecer el Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible.
La resolución 0631 de 2015	Expedido por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible el 7 de marzo de 2015, con el objetivo de fijar los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público.
Decreto 2041 de 2014	Determina las autoridades ambientales, así como la competencia que tendrá cada una para expedir la licencia ambiental según el tipo de actividad, proyecto y la dimensión de la misma. Además establece las condiciones para otorgar dicha licencia.
Resolución 1514 de 2012	Establece los términos de Referencia para la Elaboración del Plan de Gestión del Riesgo para el Manejo de Vertimientos (PGRMV) a un cuerpo de agua o al suelo.
Decreto 3930 de 2010	Establece los usos del recurso hídrico, el ordenamiento del recurso hídrico y los vertimientos al recurso hídrico y a los alcantarillados. Es aplicado a las autoridades



	ambientales, a los generadores de vertimientos y a los prestadores del servicio público domiciliario de alcantarillado.
Decreto 216 DE 2003	Establece los objetivos, la estructura y funciones del Ministerio De Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.
Ley 99 de 1993	Busca la creación del Ministerio del Medio Ambiente, la reordenación del Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, y se organiza el Sistema Nacional Ambiental (SINA).

Fuente: Autores

## 7. ESTADO DEL ARTE

El tratamiento de agua residual doméstica e industrial es de gran importancia, pues a través de estos procesos se logra disminuir la contaminación de los cuerpos de agua como ríos y quebradas, los cuales están estrechamente vinculados con las actividades productivas, la salud humana y la conservación ambiental. Como tratamiento de agua residual se utilizan procesos secundarios o biológicos que buscan la degradación de la materia orgánica biodegradable, mediante la utilización de microorganismos. Dentro de estos procesos biológicos se encuentran los sistemas lagunares, los cuales son muy utilizados en países con climas templados y tropicales, debido a que las variaciones de temperatura a lo largo del día y del año no son considerables.

A lo largo de los años se han realizado una serie de investigaciones enfocadas en el mejoramiento y optimización de los procesos de tratamiento de aguas residuales, sin embargo, es notable la falta de estudios relacionados con lagunas de estabilización para obtener diseños más eficientes.

### 7.1. RENDIMIENTO HIDRÁULICO DE UN ESTANQUE DE ESTABILIZACIÓN DE AGUAS RESIDUALES PROFUNDAS

En el año 1999, se estudió el rendimiento hidráulico de una laguna de estabilización de aguas residuales profunda, ubicado en el Campus Espinardo de la Universidad de Murcia. Se llevó a cabo en dos estaciones diferentes, invierno y verano.

A partir de los datos experimentales de la  $DBO_5$  restante se pudieron calcular las constantes cinéticas globales para la degradación de la materia orgánica. Tanto en invierno como en verano, los valores de las constantes ( $k_{20} = 0,46$  y  $0,32$  días<sup>-1</sup>) parecían apuntar a la zona activa del sistema, mostrando un comportamiento fundamentalmente aeróbico<sup>60</sup>.

### 7.2. VERIFICACIÓN DE DOS COEFICIENTES DE DISEÑO PARA LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN

---

<sup>60</sup> Torres, J.J. Soler, A. Hydraulic performance of a deep wastewater stabilization pond. En: Hydraulic performance of a deep wastewater stabilization pond. Abril, 1999. Vol. 31., no. 4, p. 679–688.

Por otra parte, en Gran Caimán (Islas Caimán) se verificó el valor del coeficiente de diseño de primer orden de mezcla completa; los coeficientes de reacción de primer orden de  $0,357 \text{ días}^{-1}$  a  $30^\circ \text{C}$ , para la eliminación de  $\text{DBO}_5$  y de  $15,7 \text{ días}^{-1}$  para la eliminación de coliformes fecales, para estanques facultativos. El estudio se realizó a partir de un sistema de lagunas de estabilización, que consta de dos estanques facultativos en paralelo, seguidos por dos estanques de maduración en serie, y que operan con un tiempo total de retención promedio de 21,2 días. La laguna facultativa tenía un área superficial de  $8800 \text{ m}^2$ , un promedio mensual de  $\text{DBO}_5$  de  $95 \text{ mg/L}$  y  $31,1^\circ \text{C}$  de temperatura; mientras que las de maduración tenían  $6400 \text{ m}^2$ , una carga promedio de  $10,1 \text{ mg/L}$  y una temperatura de  $26,6^\circ \text{C}$ .

Los resultados del análisis se realizaron por un periodo de 12 meses (de junio de 1990 a mayo de 1991), arrojando el valor del coeficiente de remoción de coliformes fecales para la metodología de primer orden y mezcla completa, a partir de una regresión lineal entre la  $\text{DBO}_5$  y el coeficiente (K). En lagunas facultativas el coeficiente de reacción promedio, para el modelo de primer orden fue de  $0,168 \text{ días}^{-1}$  con una temperatura estándar de  $30^\circ \text{C}$ ; el cual fue menor al usado en el diseño original ( $0,482 \text{ días}^{-1}$  para  $30^\circ \text{C}$ )<sup>61</sup>

### **7.3. EVALUACIÓN DEL COEFICIENTE DE REACCIÓN (K) PARA SISTEMAS DE LAGUNAS FACULTATIVAS A GRAN ESCALA**

En el año 2001 se realizó la evaluación del coeficiente de reacción (K), para sistemas de lagunas facultativas a gran escala. El estudio utilizó dos lagunas facultativas situadas en Brazlandia y Samambaia, en la región medio-oeste de Brasil; para determinar si los coeficientes globales hallados por varios métodos de diseño, pueden ser usados satisfactoriamente en casos regionales.

Se hizo una correlación entre la carga aplicada (DQO) y el coeficiente de reacción (K), con base en un ajuste matemático usando el modelo de flujo disperso. Para ello, se obtuvieron informes mensuales del sistema de lagunaje de los años 1997 a 1998, y se realizó una correlación entre la carga aplicada y el coeficiente de reacción (K). Se utilizó la carga de DQO, en sustitución de la  $\text{DBO}_5$  habitual; lo cual se hizo posible por la alta correlación que hay entre la  $\text{DBO}_5$  Y DQO para agua residual doméstica.

---

<sup>61</sup> ELLIS, K. RODRIGUES, C. Verification of two design approaches for stabilization ponds. En: Water Research. Septiembre, 1993. Vol. 27. p. 1447-1454.

El coeficiente fue determinado a partir del ajuste de la ecuación de modelo de primero orden (Arceivala, 1986). Con un  $R^2=0.819$ , los resultados proporcionan un parámetro de diseño regional, sugerido para lagunas facultativas que tratan aguas residuales domésticas en esta región<sup>62</sup>. La correlación es representada por la siguiente ecuación:

$$K = 0.005L_s - 0.056$$

Ecuación 19.  
Coeficiente de  
reacción de Brasil

Donde:

K: coeficiente de reacción ( $d^{-1}$ )

L<sub>s</sub>: Carga aplicada (Kg/ hab-día)

#### **7.4. CONSTANTES CINÉTICAS EN LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN (CASO DE UNA REGIÓN CON CLIMA SECO-SEMIÁRIDO)**

El diseño de lagunas de estabilización está regido por la determinación de constantes cinéticas de carga orgánica y decaimiento bacteriano, que dependen de variables ambientales y de la cantidad de materia orgánica; es decir, que la actividad de las lagunas será afectada por los parámetros climatológicos del lugar donde estas se emplearán. El objetivo es calcular las constantes cinéticas mediante modelos que se adecúen a dichas condiciones climáticas, con el fin de que no se presente un funcionamiento inadecuado y/o inesperado de las lagunas como resultado de malos planteamientos de diseño.

El sistema estudiado se sitúa al norte de México, en donde se presenta un clima seco estepario semi-cálido a una altura de 2027 m.s.n.m y una temperatura media en el mes más frío de 9,2°C. En este lugar, se encuentra un sistema lagunar en serie conformado por una laguna anaerobia, una facultativa y otra de maduración; con un tiempo de retención hidráulica de 4 días para las dos primeras y 5 días para la última. Las lagunas reciben las aguas residuales municipales, además de las descargas de una empacadora de carnes y una fábrica de productos lácteos.

<sup>63</sup>

---

<sup>62</sup> SOARES, S. BERNANDES, R. Reaction coefficient (K) evaluation for full-scale facultative pond systems. En: Bioresource Technology. Mayo, 2001. Vol. 78. no. 1, p. 99-102

<sup>63</sup> ESCALANTE, Violeta. MENDIOLA, Claudia. Texto [en línea]. Constantes cinéticas en lagunas de estabilización. Jiutepec (México): Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. [Citado el: 19 de abril de 2018.] Disponible en Internet:< <http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/aresidua/mexico/01062e14.pdf>>

Tabla 4. Relación de resultados del estudio de constantes cinéticas en lagunas de estabilización (caso de una región con clima seco-semiárido)

PARÁMETRO	LAGUNA ANAEROBIA	LAGUNA FACULTATIVA	LAGUNA DE MADURACIÓN
Remoción de carga orgánica (DBO) (%)	31,61	73,22	-
Coliformes Fecales (%)	-	88,89	85,80
Nematodos (%)	89,00	100,00	-
Tiempo de retención (días)	8,71	5,44	5,44
Modelo de Vincent (K) (días <sup>-1</sup> )	1,80	-	-
<b>FLUJO DISPERSO</b>			
K (días <sup>-1</sup> )	-	0,34	0,04
Kb (días <sup>-1</sup> )	-	1,48	0,57
<b>MEZCLA COMPLETA</b>			
K (días <sup>-1</sup> )	-	0,51	0,04
Kb (días <sup>-1</sup> )	-	23,46	3,84

Fuente: ESCALANTE, Violeta. MENDIOLA, Claudia. Texto [en línea]. Constantes cinéticas en lagunas de estabilización. Jiutepec (México)

## 7.5. EFICIENCIA DE LAS LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN DE LA CIUDAD DE CATAMARCA Y SU RELACION CON LA ESTIMADA POR LOS MODELOS DE DISEÑO

En el año 2006, en la capital de la provincia de Catamarca en Argentina, se buscó determinar la eficiencia de remoción orgánica y bacteriana del sistema de lagunas de estabilización, basándose en la comparación con modelos de diseño existentes. Partieron del muestreo realizado en el afluente y efluente del sistema, en donde se hallaron coliformes fecales y DBO<sub>5</sub>. Dicho sistema está compuesto por seis módulos en paralelo, que están compuestos a su vez por un grupo de cinco lagunas de oxidación en serie, ubicados en el siguiente orden: una laguna anaerobia, seguida de una laguna facultativa y posteriormente se encuentran tres lagunas de maduración.

Para la determinación de la eficiencia de la remoción de carga orgánica, se emplearon los modelos de Thirimurthy, Marais y Shaw y del CEPIS; a su vez se utilizaron las constantes de remoción de las correlaciones del CEPIS, Mara, Gloyna y Yáñez, mediante los cuales se encontraron los siguientes resultados<sup>64</sup>:

<sup>64</sup> SARACHO, M., RODRIGUEZ, N. Texto [en línea]. Eficiencia de las lagunas de estabilización de la ciudad de Catamarca y su relación con la estimada por los modelos de diseño. Catamarca, Argentina. Universidad

Tabla 5. Eficiencia de remoción de materia orgánica estimada por los modelos de diseño y determinada experimentalmente en los módulos N° 1, 2 y 3 del sistema.

Modelos	Correlación	$E_f$	Módulo 1		Módulo 2		Módulo 3	
			$E_{f0}$	$r$ ( $E_{f0}/E_f$ )	$E_{f0}$	$r$ ( $E_{f0}/E_f$ )	$E_{f0}$	$r$ ( $E_{f0}/E_f$ )
Thirimurthy	Mara	99,5	54.4	0,55	52.0	0,52	69.2	0,69
	CEPIS	93,3		0,58		0,55		0,74
Marais y Shaw	Mara	94,3		0,58		0,55		0,73
	Gloyna	85,6		0,63		0,60		0,81
	Yanez	94,9		0,57		0,55		0,73
CEPIS	CEPIS	82,1		0,66		0,63		0,84

Fuente: SARACHO, M., RODRIGUEZ, N. Texto [en línea]. Eficiencia de las lagunas de estabilización de la ciudad de Catamarca y su relación con la estimada por los modelos de diseño. Catamarca, Argentina.

Tabla 6. Eficiencia de remoción de materia orgánica estimada por los modelos de diseño y la obtenida en los módulos N° 3, 4 y 5 del sistema.

Modelos	Correlación	$E_f$	Módulo 4		Módulo 5		Módulo 6		Salida del Sistema	
			$E_{f0}$	$r$ ( $E_{f0}/E_f$ )	$E_{f0}$	$r$ ( $E_{f0}/E_f$ )	$E_{f0}$	$r$ ( $E_{f0}/E_f$ )	$E_{fr}$	$r$ ( $E_{f0}/E_f$ )
Thirimurthy	Mara	99,5	48.4	0,49	36.8	64.8	49	0,65	0,49	
	CEPIS	93,3		0,52				0,39	0,52	
Marais y Shaw	Mara	94,3		0,51				0,39	0,52	
	Gloyna	85,6		0,56				0,43	0,76	
	Yanez	94,9		0,51				0,39	0,68	
CEPIS	CEPIS	82,1		0,59				0,45	0,79	0,60

Fuente: SARACHO, M., RODRIGUEZ, N. Texto [en línea]. Eficiencia de las lagunas de estabilización de la ciudad de Catamarca y su relación con la estimada por los modelos de diseño. Catamarca, Argentina.

## 7.6. DETERMINACIÓN DE PERFILES, CONSTANTES CINÉTICAS Y ECUACIONES DE DISEÑO EN UNA LAGUNA FACULTATIVA

Para el estimativo de las constantes cinéticas y la determinación de perfiles de esta laguna facultativa, se realizó un seguimiento durante 2 años, tiempo en el cual se construyeron perfiles de oxígeno disuelto y temperatura. El primer perfil indicó que la capa aerobia de la laguna abarca una profundidad de 25 cm, el segundo perfil mostró una variación significativa entre la temperatura del fondo y la superficie, lo que resulta en la estratificación térmica promoviendo así la formación de cortocircuitos en la laguna.

Como resultado de la determinación de constantes de remoción se obtuvieron que para carga orgánica K es de 0.164 días<sup>-1</sup> y para carga bacteriana k es igual a 1.39 días<sup>-1</sup>, aplicando la ecuación de flujo disperso. Las ecuaciones estipuladas para el diseño de remoción de carga orgánica en lagunas facultativas, determinaron que las variables más representativas fueron DBO soluble, tiempo de retención hidráulico, temperatura ambiente, oxígeno disuelto, pH y color; mientras que para el cálculo de coeficientes de remoción de coliformes fecales, las variables que influyeron fueron el tiempo de retención hidráulico, carga de coliformes, oxígeno disuelto, conductividad eléctrica y color<sup>65</sup>.

### 7.7. ANÁLISIS CINÉTICO DE LA ELIMINACIÓN DE MATERIA ORGÁNICA EN UN ESTANQUE DE ESTABILIZACIÓN EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO AGUAS RESIDUALES DE BIRJAND

En Birjand se efectuó el análisis cinético mediante el modelo de primer orden, el modelo de eliminación del sustrato de segundo orden o más conocido como modelo de Grau y Stover y Kincannon. Se midieron los materiales orgánicos de DQO y DBO<sub>5</sub> en tres puntos de un sistema de lagunas de estabilización compuesto por lagunas anaerobias, una laguna facultativa y una de maduración.

El promedio de concentración de salida para DQO y DBO<sub>5</sub> en las lagunas anaeróbicas y de maduración son de 307 mg/L, 135.18 mg/L, 69.025 mg/L y 136.75 mg/, respectivamente. Como resultado del estudio se obtuvo un porcentaje de remoción para las lagunas anaeróbicas del 40% y del 70% para lagunas de facultativas y de maduración. Al realizar la regresión de cada modelo se determinó.<sup>66</sup>

Tabla 7. Determinación de coeficientes cinéticos de remoción de materia orgánica en el sistema de lagunas de estabilización

DETERMINACIÓN DE COEFICIENTES CINÉTICOS DE REMOCIÓN DE MATERIA ORGÁNICA EN EL SISTEMA DE LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN				
STOVER-KINCANNON				
ECUACIÓN	R <sup>2</sup>	U <sub>max</sub>	Kn	Coefficiente de remoción
$Y = 1,285X - 0,01$ $R^2 = 0,837$	0,837	100	128,5	sDBO <sub>5</sub>
$Y = 1,573x - 0,042$ $R^2 = 0,907$	0,907	23,81	37,45	sCOD

65 NORIEGA, Hugo. ESCALANTE, Violeta. Determinación de perfiles, constantes cinéticas y ecuaciones de diseño en una laguna facultativa. Jiutepec (México): Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

66 RASOUL, Khrosravi. TAHER, Shaharyari. Texto [en línea]. Kinetic analysis of organic matter removal in stabilization pond in the wastewater treatment plant of Birjand. Birjand. Birjand University of Medical Sciences. . [Citado el: 19 de abril de 2018.] Disponible en Internet:< [https://www.researchgate.net/publication/289481899\\_Kinetic\\_analysis\\_of\\_organic\\_matter\\_removal\\_in\\_stabilization\\_pond\\_in\\_the\\_wastewater\\_treatment\\_plant\\_of\\_Birjand](https://www.researchgate.net/publication/289481899_Kinetic_analysis_of_organic_matter_removal_in_stabilization_pond_in_the_wastewater_treatment_plant_of_Birjand)>

MODELO DE PRIMER ORDEN				
ECUACIÓN	R <sup>2</sup>	K <sub>1</sub>	Coeficiente de remoción	
Y= 0,091x+4,623 R <sup>2</sup> = 0,100	0,1	0,091	sDBO <sub>5</sub>	
Y= 0,060x+4,105 R <sup>2</sup> = 0,144	0,144	0,06	sCOD	
MODELO GRAU				
ECUACIÓN	R <sup>2</sup>	N	M	Coeficiente de remoción
Y= 88,63-4,271X R <sup>2</sup> = 0,396	0,396	4,271	88,63	sDBO <sub>5</sub>
Y= 5,091X-39,28 R <sup>2</sup> = 0,311	0,311	5,091	39,28	sCOD

Fuente: RASOUL, Khrosravi. TAHER, Shaharyari. Texto [en línea]. Kinetic analysis of organic matter removal in stabilization pond in the wastewater treatment plant of Birjand. Birjand. Birjand University of Medical Scienes.

### 7.8. DETERMINACIÓN DE LOS COEFICIENTES DE REACCIÓN DEL CRECIMIENTO BIOLÓGICO Y DECAIMIENTO ENDÓGENO EN LAS LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN DEL MUNICIPIO DE ZIPAQUIRÁ.

En el año 2017, Torres realizó un estudio para determinar los coeficientes de crecimiento microbiano (Kd) y el coeficiente de mortalidad microbiana (Ks). Con el fin de interpretar su funcionamiento en términos cinéticos y químicos; se tomaron muestras obtenidas de las lagunas ubicadas en el municipio de Zipaquirá en su planta de tratamiento de agua residual, ZIPA II y ZIPA I, la cual cuenta con una laguna anaerobia seguida de una laguna facultativa<sup>67</sup>.

Se analizaron las muestras para determinar la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO, que junto con las ecuaciones de carga orgánica volumétrica y la ecuación propuesta por Vincent (Ecuación 4) permitieron determinar que las lagunas anaerobias trabajan con una constante de crecimiento biológico (K<sub>s</sub>) entre 1.1 días<sup>-1</sup> y 2.59 días<sup>-1</sup>; las cuales se acercan a los valores propuestos por otros autores, con base en análisis realizados en lugares con diferentes características climáticas. En primer lugar, se propuso una ecuación para calcular la Carga Superficial Removida (C<sub>sr</sub>) en función de la Carga Orgánica Aplicada (C<sub>sa</sub>), la cual se muestra a continuación<sup>68</sup>:

$$C_{sr} = -14.6 + 0.6876 C_{sa}$$

Ecuación 20.  
Carga orgánica removida,  
determinada en Zipaquirá

<sup>67</sup> TORRES, Oscar. Texto [en línea]. Determinación de los Coeficientes de Reacción del Crecimiento Biológico y Decaimiento Endógeno en las Lagunas de Estabilización del Municipio de Zipaquirá. Bogotá. UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA. [Citado el: 29 de marzo de 2018.] Disponible en Internet:< <http://repository.ucatolica.edu.co/handle/10983/14516>>

<sup>68</sup> TORRES. Op. cit.



Sin embargo, propuso una ecuación que muestra la eficiencia de remoción en carga superficial teniendo en cuenta el periodo de retorno:

$$C_{sr} = -256.06 + 0.75 C_{sa} + 23.53 PR$$

Ecuación 21.  
Carga orgánica removida,  
en función del periodo de  
retención

Además, en las lagunas facultativas se calcularon los valores de las constantes de degradación global ( $k'$ ) con base en la temperatura y de acuerdo con el modelo de cinética de primer orden. En promedio, se obtuvieron valores de 0,1 y 0,21 para ZIPA I Y ZIPA II, respectivamente. Por último, se determinó que el coeficiente ( $K_d$ ), para ZIPA II, es en promedio de 0,040; la cual se encuentra dentro de los valores recomendados en la teoría, con una media de 0,040 días<sup>-1</sup> <sup>69</sup>.

## 7.9. CARGA SUPERFICIAL MÁXIMA EN LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN DE NICARAGUA

En 2017, a raíz de falta de leyes que reglamenten el diseño de lagunas de estabilización en Nicaragua, y de los diferentes métodos que se utilizan para establecer la carga máxima superficial en el diseño de lagunas de estabilización, se realizó un estudio enfocado en la determinación de ésta mediante diversos métodos empíricos en la que se correlacionaba la acción de la temperatura (ambiental y del agua), la latitud y la radiación solar. Dicha evaluación se realizó en la laguna primaria facultativa, de dos plantas de tratamiento, denominadas “El patriarca” y “San Rafael sur”, ubicadas en el municipio de Nagarote en el pacífico nicaragüense.

De acuerdo a los datos recaudados en las dos PTAR: caudales, carga orgánica aplicada y área de las lagunas. Se estimaron los valores de carga orgánica total y carga orgánica superficial, mediante las formulaciones de diferentes autores.

Partiendo de los resultados obtenidos el autor llega a la siguiente conclusión: *“De acuerdo a los resultados obtenidos al calcular la Carga Superficial Máxima con todos los métodos disponibles, se define que el método de Carga Superficial Máxima que mejor se adecúa a las dos lagunas de estabilización en estudio es la propuesta por CEPIS a través de Fabián Yáñez, debido a que genera una CSM mayor que la CSA y el cálculo del área da un valor muy aproximado al área real de las lagunas primarias. El resto de métodos da como resultados CSM menores a la*

---

<sup>69</sup> TORRES. Op. cit.

*CSA de las lagunas en estudio y por consiguiente un área de laguna mayor al área que poseen actualmente.*<sup>70</sup>

---

<sup>70</sup> VANEGAS, Carlos. Texto [en línea]. Carga superficial máxima en lagunas de estabilización de Nicaragua. Managua, Nicaragua. Universidad Nacional de Ingeniería. [Citado el: 19 de abril de 2018.] Disponible en Internet:< <https://www.lamjol.info/index.php/NEXO/article/view/5169>>

## 8. METODOLOGÍA

La metodología utilizada para la determinación de los coeficientes cinéticos en lagunas de estabilización, se desarrolló con ayuda de información obtenida de un sistema lagunar de una industria alimentaria, ubicada en la sabana de Bogotá. En el desarrollo del proyecto se identifican 4 fases:

- **Fase 1 – Recaudo de la información y análisis experimental:** En primer lugar, se realizó la contextualización mediante la recolección y estudio de las teorías existentes, conocimientos e información del tema a tratar en este trabajo de investigación, es decir, el tratamiento de aguas residuales por medio de lagunas de estabilización; en bibliografía perteneciente a la Universidad Católica de Colombia y otras instituciones, además, en revistas y en bases de datos.

En esta fase se recaudó toda la información de la planta de tratamiento como su ubicación, funcionamiento y sus características físicas; además, de establecer los parámetros a tener en cuenta al momento de recolectar las muestras y otros aspectos como el transporte, el análisis se debía efectuar y en donde se debía realizar la caracterización del muestreo.

- **Fase 2 – Ejecución del Proyecto:** En cuanto a la ejecución del proyecto, una vez caracterizada todas las muestras que se realizaron inicialmente, se efectuó el análisis del funcionamiento de la planta y partiendo de esto; se establecieron los datos funcionales y los que debían ser obviados para el cumplimiento de los objetivos de este proyecto. De esta manera, y en conjunto con estudios que se habían realizado por otros autores, se postularon diferentes métodos para hallar los coeficientes de remoción de DBO (K) y que se utilizan para el diseño de lagunas de estabilización.
- **Fase 3 – Análisis de resultados:** Una vez obtenidos los coeficientes de remoción por diferentes métodos, se analizaron las discrepancias y semejanzas que presentaban los resultados con respecto a los hallados por otros autores; además, se establecieron las posibles causas que provocan un funcionamiento inadecuado en el sistema lagunar.
- **Fase 4 – Conclusiones y recomendaciones:** Partiendo del análisis realizado se establecieron las soluciones que se podrían emplear, para mejorar la

operación y/o funcionamiento de lagunas, además de establecer que significó para el proyecto los resultados encontrados.

### **8.1. TIPO DE ESTUDIO**

El proyecto es de tipo analítico-experimental puesto que se basa en la recolección de datos en la planta de Productos Ramo S.A., para analizarlos y posteriormente determinar los coeficientes de remoción, en el diseño de lagunas de estabilización como sistema de tratamiento de agua residual industrial (ARI), en la sabana de Bogotá.

### **8.2. FUENTES DE INFORMACIÓN**

Para el desarrollo de este proyecto se recurrió a fuentes de información primarias como son: consulta de los sistemas de lagunaje ubicados en cercanías a la sabana de Bogotá en la Secretaría Distrital de Ambiente y en la CAR; posterior a esto, se recolectaron las memorias de cálculo y caracterizaciones ya realizadas en la PTAR, así como muestras de agua del sistema para realizar en su análisis en un laboratorio ambiental.

Por otra parte, en las fuentes de información secundarias se encuentran los libros relacionados con los parámetros físicos y químicos que caracterizan a las lagunas de estabilización, en varios idiomas; además, se consultaron publicaciones desde las bases de datos dispuestas por la universidad, de estudios realizados en diferentes países.

## 9. DISEÑO METODOLÓGICO

Según el problema planteado y los objetivos propuestos, el tipo de investigación empleado es el estudio de caso de manera cuantitativa; a partir de la implementación de modelos matemáticos, en los que se analizan los factores de incidencia para la determinación de variables, y se efectúa su correspondiente comparación con las halladas de manera teórica.

El presente estudio, se enfoca en un caso particular de la industria alimentaria, en el que se analizó el funcionamiento del sistema de lagunas de estabilización ubicado en industrias Ramo S.A., en la planta de Mosquera. En dicho lugar, se recaudaron las muestras, se realizó el correspondiente análisis físico-químico y con los datos hallados, se efectuó los cálculos a partir de los modelos matemáticos estipulados; con el fin de aproximar valores teóricos de los coeficientes de remoción, que se asemejen a las condiciones que se presentan allí, y que influyen en gran medida en el diseño de las lagunas de estabilización, así como en su funcionamiento.

Con el fin de desarrollar el proyecto de una manera adecuada, se buscó caracterizar las muestras de aguas de forma representativa a lo largo del tratamiento, por lo que se realizó un sondeo de la planta para poder determinar, la manera más efectiva de realizar el muestreo. Cabe destacar que esta decisión también se tomó a partir de las limitantes económicas del equipo de trabajo. Posteriormente, se realizó la revisión de los diferentes métodos teóricos para el cálculo del coeficiente cinético de remoción ( $K$ ), además, se solicitaron los diseños iniciales del sistema de lagunas de estabilización, con el fin de verificar su funcionalidad y de esta manera analizar los resultados provenientes de la caracterización de muestras.

### 9.1. DESARROLLO METODOLÓGICO

Para el análisis de los parámetros de las lagunas, se realizaron 3 muestreos en los meses de noviembre y diciembre de 2017 y el mes de enero del 2018; en los que se realizó la recolección de 1000 ml de agua con el que se efectuó el análisis de  $DBO_5$ . Se tomaron muestras en la entrada y salida de todas las lagunas (las lagunas anaerobias se tomaron como un conjunto, debido a que parte de los jarillones que las dividían han colapsado). Las muestras fueron transportadas en botellas de plástico color ámbar en una nevera con hielo, para evitar la alteración de las mismas; hasta el laboratorio para su análisis de la  $DBO_5$  y DQO; dos horas

después de su recolección. Cabe resaltar que el pH fue medido en campo con un instrumento portátil.

Solo en el primer muestreo se analizó la DQO, para la cual se necesitaron 500 ml de muestra adicional de cada punto de análisis, con el fin de determinar la biodegradabilidad de las lagunas. En las lagunas anaerobias solo se hizo la recolección de la muestra a la entrada de la primera laguna de oxidación, sin embargo, el dato del afluente de la primera laguna facultativa, se tomó como el afluente de la anaerobia, debido a la ubicación en serie de los reactores (ver puntos de muestreo en el anexo D). Además de la caracterización anteriormente efectuada, se realizó la evaluación de alcalinidad, SST, dureza, entre otros; con el fin de evaluar los aspectos que influyen en los resultados, en el caso de ser necesario, y así poder determinar su funcionamiento en términos cinéticos y químicos.

El caudal utilizado para realizar los cálculos, se obtuvo a partir del promedio de los caudales obtenidos de los informes de laboratorio realizados por la empresa. Además, se verificaron el largo y ancho de todas las lagunas con un decámetro así como la profundidad de las lagunas en el inicio, mitad y final de cada laguna; para obtener una profundidad promedio.

Partiendo de los resultados obtenidos de  $DBO_5$  de los diferentes puntos de muestreo se determinó el porcentaje de remoción de todo el sistema, así como el de cada laguna. En esta, se identificó una inconsistencia de remoción de carga orgánica, por lo que resultó conveniente establecer la remoción que efectuaría el sistema, a partir de las características físicas del mismo. Para esto, se utilizó la correlación de Marais para la constante de reacción, y el modelo de flujo pistón para lagunas facultativas. También se estimó la eficiencia de remoción que realizaban las lagunas y se relacionó con los datos hallados de manera teórica; a partir de lo anterior, se determinó el porcentaje de variación.

A su vez, se determinó la biodegradabilidad del sistema a partir de la carga orgánica, medida en términos de  $DBO_5$  y DQO, para determinar si era adecuado implementar un sistema de tratamiento biológico, como lo son las lagunas de estabilización; o por el contrario, el tipo de agua residual generada requería otro tipo de tratamiento.

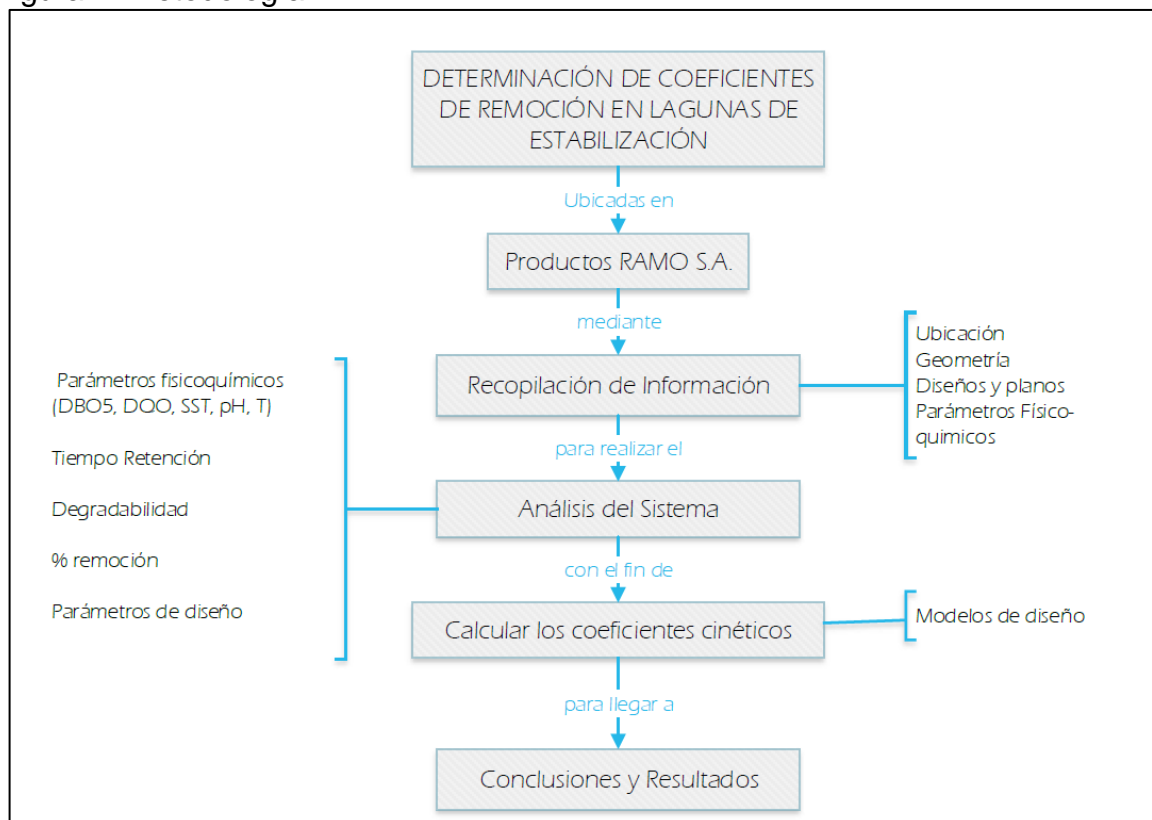
Posteriormente, para la determinación de las constantes de remoción de lagunas facultativas, se emplearon los modelos de flujo de mezcla completa (Ecuación 7), flujo pistón (Ecuación 12) y flujo arbitrario o disperso (Ecuación 8); con el propósito

de establecer una comparación entre ellos. Asimismo, los dos primeros modelos de flujo se equipararon con las expresiones formuladas por Marais (Ecuación 13) y Gloyna (Ecuación 14), las cuales se determinaron a partir de la temperatura hallada in situ, con temperatura base de 20°C.

Para establecer la constante de remoción por medio del modelo de flujo disperso, en primer lugar, se halló el número de dispersión (d) para lo cual se empleó la expresión hallada por Sáenz (1985); en la que se encontró un número de dispersión cercano a cero, por lo que el programa no logra efectuar el procedimiento para resolver dicha ecuación. Además, se utilizó la expresión postulada por Wehner, Wilhelm y Polprasert, con la que se determinó el valor del coeficiente de remoción.

Finalmente, con los datos recaudados para la laguna anaerobia se estimó una ecuación representativa de la Carga Orgánica Volumétrica en función de la temperatura. Para esto se calculó la carga orgánica volumétrica (establecida a partir del caudal, volumen de la laguna y DBO<sub>5</sub> en la entrada) Vs la temperatura.

Figura 7. Metodología



Fuente: Autores

## 9.2. HERRAMIENTA DE PREDIMENSIONAMIENTO DE LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN

Según Moore<sup>71</sup>, Matlab es un software de lenguaje técnico que ofrece un entorno de escritorio perfeccionado para el análisis iterativo con lenguaje de programación propio; es utilizado para la implementación de algoritmos, la representación de datos y funciones, la creación de interfaz de usuario, entre otros. Esta herramienta se emplea para el desarrollo de gráficos representativos.

En este estudio se realizó la determinación de las constantes cinéticas de remoción para los modelos de flujo pistón y mezcla completa, así como la gráfica de eficiencia según el modelo de mezcla completa, en el caso de lagunas facultativas; además, de la gráfica que representa la Carga Orgánica Volumétrica en función de la temperatura, esto para lagunas anaerobias, mediante la programación en Matlab:

[https://drive.google.com/open?id=1g9nxvoq\\_vjeCtYvWUGOjcLO8k1HZ6V-z](https://drive.google.com/open?id=1g9nxvoq_vjeCtYvWUGOjcLO8k1HZ6V-z)

## 9.3. VARIABLES

- Variable dependiente: La variable respuesta fue la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO).
- Variables independientes: Tiempo de retención hidráulica, temperatura del agua, tasa de aplicación superficial, concentración de la biomasa, pH.
- Variables de control: Se controlaron los sitios de muestreo, siendo fijos en cada sistema de lagunas: a la entrada del afluente y a la salida de las mismas.

---

<sup>71</sup> MOORE, Holly. Matlab para ingenieros. Pearson Educación, 2007. P.5-9



## 10. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

### 10.1. LOCALIZACIÓN

Según Productos Ramo<sup>72</sup>, el sistema de lagunaje está ubicado en el predio El Perú en las coordenadas X: 981459 y Y: 1013690, en el interior de la Zona Franca de Occidente; junto a la planta de Mosquera, la cual está situada en la Carretera Occidente Kilómetro 20, vía Mosquera – Madrid.

Figura 8. Ubicación del sistema de tratamiento



Fuente: Autores

### 10.2. DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA

La planta de tratamiento de aguas residuales de Industrias Ramo S.A.<sup>73</sup>, se centra en el tratamiento de las aguas resultantes de la fabricación de productos a base maíz; desde su lavado hasta las aguas que se generan de la limpieza de la maquinaria y posteriormente, el agua se conduce al sistema de lagunas de estabilización desde el pozo de bombeo.

<sup>72</sup> PRODUCTOS RAMO S.A., Memorias de cálculo del sistema de tratamiento. Productos Ramo S.A. Bogotá, 2015. p. 7.

<sup>73</sup> Ibíd, p.4.

Figura 9. Esquema del proceso de tratamiento de agua residual.



Fuente: Productos Ramo S.A. Memorias de cálculo de sistema, 2017.

Asimismo, Productos Ramo señala que el tratamiento primario estaba compuesto de 5 lagunas anaerobias en serie que, además, funcionan como trampas de grasas y sedimentadores; sin embargo, como consecuencia de la ampliación de la zona franca, donde actualmente está ubicado el sistema de tratamiento, la primera laguna anaerobia fue retirada antes de iniciar el presente trabajo.<sup>74</sup>

Figura 10. Laguna anaerobia N° 1 (Entrada al sistema)



Fuente: Autores

<sup>74</sup> Ibíd, p.7.

El agua es conducida a través de las lagunas por tubos sumergidos de PVC de 8 pulgadas, con el fin de evitar el paso de sobrenadantes de una laguna a otra. Cabe resaltar, que el lodo producido en las lagunas se evacúa manualmente, sin embargo, se desconoce la frecuencia de dicha remoción.<sup>75</sup> Las características medidas en el lugar son las siguientes:

Tabla 8. Dimensiones de diseño para las lagunas anaerobias.

<b>LAGUNA ANAEROBIA</b>	<b>ALTURA (m)</b>	<b>ANCHO (m)</b>	<b>LONGITUD (m)</b>	<b>TRH (días)</b>	<b>ÁREA (m<sup>2</sup>)</b>
1	2,25	8,1	17,4	0,81	140,94
2	1,85	9,6	20,5	0,92	196,8
3	1,9	10,2	20,5	1,96	209,1
4	1,7	9,1	38,8	1,52	353,08

Fuente: Productos Ramo S.A. Memorias de cálculo de sistema, 2017.

Figura 11. Laguna anaerobia 2 y 3.



Fuente: Autores

Posteriormente, el agua circula a través de 5 lagunas facultativas, en las cuales continúa la degradación de la materia orgánica por 24.10 días. Dichas lagunas se caracterizan por tener una profundidad de 1.95 metros, un ancho de 6.70 metros y

<sup>75</sup> Ibíd, p.12.

una longitud de 140 metros, aproximadamente. Finalmente, se vierten las aguas tratadas a un canal que posteriormente conecta con el Río Subachoque.<sup>76</sup>

Figura 12. Laguna facultativa.



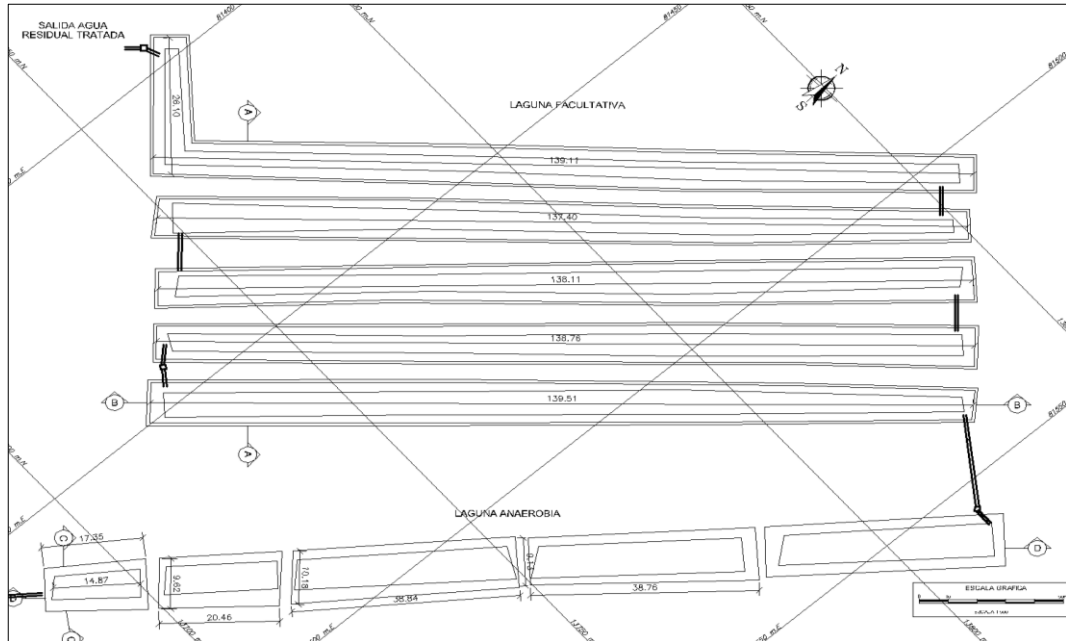
Fuente: Autores

Todas las lagunas facultativas son iguales a la que se observa en la Figura 12. Asimismo, la distribución y dimensiones de las lagunas anaerobias y facultativas se muestran a continuación:

---

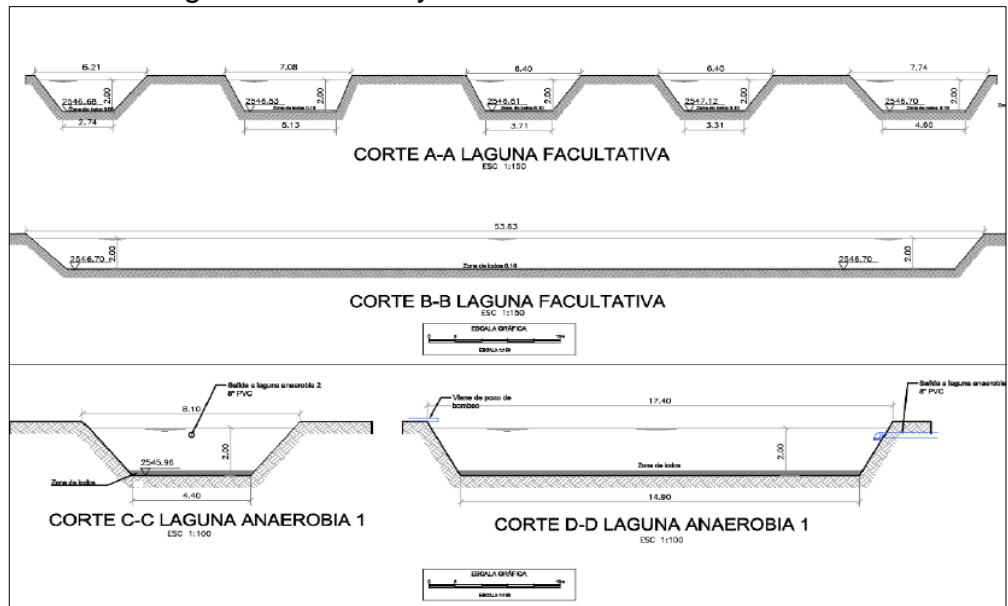
<sup>76</sup> PRODUCTOS RAMO S.A. Manual de Mantenimiento y Operación Serpentin Zona Franca de Occidente, 2017.

Figura 13. Plano hidráulico del sistema de tratamiento.



Fuente: Productos Ramo S.A. Memorias de cálculo de sistema, 2017.

Figura 14. Corte laguna facultativa y anaerobia.



Fuente: Productos Ramo S.A. Revisión Sistema de Tratamiento de Agua Residual Industrial, 2017.

## 11. RESULTADOS

### 11.1. DATOS HISTÓRICOS

Se solicitaron a la empresa los datos históricos de DBO, DQO y temperatura de cada laguna; sin embargo, debido a que el sistema fue modificado en el año 2015, solo se cuenta con 2 caracterizaciones de los años 2016 y 2017, realizadas por la empresa mediante la contratación de un laboratorio ambiental privado, en los que se realizó un análisis en el afluente y efluente del sistema. Los datos extraídos se muestran a continuación:

Tabla 9. Resultados de caracterización del año 2016

MUESTREO AÑO 2016		
PARÁMETRO	ENTRADA	SALIDA
pH	9.20-10.98	6.93-7.44
Temperatura (°C)	26.2-26.7	23.0-25.0
DBO5 (mg O <sub>2</sub> /L)	3690	35
DQO (mg O <sub>2</sub> /L)	4919	109

Fuente: Productos Ramo S.A., 2016

Tabla 10. Resultados de caracterización del año 2017

MUESTREO AÑO 2017		
PARÁMETRO	ENTRADA	SALIDA
pH	10.94-12.71	7.60-8.71
Temperatura (°C)	24.0-28.0	15.0-18.0
DBO5 (mg O <sub>2</sub> /L)	2990	184
DQO (mg O <sub>2</sub> /L)	4760	272

Fuente: Productos Ramo S.A., 2017

Además, se utilizaron de las caracterizaciones los caudales obtenidos mediante aforos:

Tabla 11. Caudal del sistema

AÑO	CAUDAL ENTRADA (L/s)	CAUDAL ENTRADA (m <sup>3</sup> /día)
2016	5,6	483,8
2017	1,8	155,5
Promedio	1,8	319,6

Fuente: Productos Ramo S.A., 2017

## 11.2. ANÁLISIS DE LABORATORIO

Los resultados de los análisis realizados mediante la contratación de una empresa privada, se muestran a continuación:

Tabla 12. Resultados del primer muestreo

<b>MUESTREO No 1 - Fecha: 21/11/2017</b>						
Nombre de la estación	Punto de muestreo	Hora	Temperatura (°C)	pH	DBO <sub>5</sub> (mgO <sub>2</sub> /L)	DQO (mgO <sub>2</sub> /L)
Pozo de bombeo	P1	10:13 a.m.	24,5	11	2010	11552
Final Anaerobia	P2	11:37 a.m.	24,5	6 a 7	336	5504
Lag. Facultativa	P3	12:07 p.m.	21	7 a 8	281	4544
Lag. Facultativa	P4	11:53 a.m.	24	6 a 7	527	5024
Lag. Facultativa	P5	11:16 a.m.	19,5	7	1088	7744
Lag. Facultativa	P6	12:40 p.m.	25	7	434	5024
Salida	P7	12:29 p.m.	19	7	300	5760

Fuente: Autores

Tabla 13. Resultados del segundo muestreo

<b>MUESTREO No 2 - Fecha: 14/12/2017</b>					
Nombre de la estación	Punto de muestreo	Hora	Temperatura (°C)	pH	DBO <sub>5</sub> (mgO <sub>2</sub> /L)
Pozo de bombeo	P1	9:45 a.m.	24,5	12,1	3140
Inicio lag. Anaerobia	P1	11:52 a.m.	24	9,7	-
Final lag. anaerobia	P2	10:40 a.m.	23,5	6,3	258
Lag. Facultativa	P3	11:40 a.m.	22,5	6,6	892
Lag. Facultativa	P4	10:58 a.m.	21	6,9	697
Lag. Facultativa	P5	11:30 a.m.	23	7,4	526
Lag. Facultativa	P6	11:06 a.m.	23	7,5	590
Salida	P7	11:19 a.m.	22,5	7,9	569

Fuente: Autores

Tabla 14. Resultados del tercer muestreo

<b>MUESTREO No 3 - Fecha: 25/01/2018</b>					
Nombre de la estación	Punto de muestreo	Hora	Temperatura (°C)	pH	DBO <sub>5</sub> (mgO <sub>2</sub> /L)
Pozo de bombeo	P1	10:25 a.m.	24,5	12,1	12164
Inicio lag. Anaerobia	P1	11:52 a.m.	24	9,7	-
Final lag. anaerobia	P2	11:01 a.m.	22,5	6,20	1159
Lag. Facultativa	P3	10:36 a.m.	20,5	6,2	1133
Lag. Facultativa	P4	11:06 a.m.	20	6,7	294
Lag. Facultativa	P5	10:42 a.m.	20,5	7,2	215
Lag. Facultativa	P6	11:11 a.m.	19	7,4	243
Salida	P7	10:47 a.m.	21	7,5	231

Fuente: Autores

Además, fueron medidos en el laboratorio de la Universidad Católica de Colombia, otros parámetros físicos-químicos de las lagunas dentro de las primeras 48 horas a partir del muestreo, los cuales se pueden ver en el anexo E.

### 11.3. CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA

Se midió la profundidad en 3 puntos de la laguna facultativa para establecer un promedio de operación para cada una, las cuales se muestran a continuación:

Tabla 15. Profundidad de las lagunas facultativas

<b>LAGUNA</b>	<b>PROFUNDIDAD (m)</b>			<b>PROMEDIO</b>
Laguna anaerobia	0,73	0,69	-	0,71
Laguna facultativa 1	0,63	-	-	0,63
Laguna facultativa 2	0,85	0,67	0,84	0,79
Laguna facultativa 3	0,84	0,92	1,04	0,93
Laguna facultativa 4	0,70	0,82	0,86	0,79
Laguna facultativa 5	0,74	0,64	0,49	0,62

Fuente: Autores

Además, se establecieron las características dimensionales actuales, de las lagunas anaerobias y facultativas; como se puede ver en la tabla 16 y 17, respectivamente.

Tabla 16. Dimensiones reales de las lagunas facultativas

<b>LAGUNA</b>	<b>LARGO (m)</b>	<b>ANCHO (m)</b>	<b>PROFUNDIDAD (m)</b>	<b>VOLUMEN (m<sup>3</sup>)</b>
Laguna anaerobia	-	-	0,71	-
Laguna facultativa 1	139,51	6,71	0,63	589,75
Laguna facultativa 2	138,78	7,08	0,79	771,31
Laguna facultativa 3	138,11	6,4	0,93	823,50
Laguna facultativa 4	137,4	6,4	0,79	697,04
Laguna facultativa 5	139,11	7,74	0,62	668,28

Fuente: Autores



Tabla 17. Dimensiones de las lagunas anaerobias

LAGUNA	LARGO (m)	ANCHO (m)	PROFUNDIDAD (m)	VOLUMEN (m <sup>3</sup> )
1	17,4	7,4	2,25	289,71
2	20	7,4	2,25	333
3	31,7	8,5	1,9	511,96
4	38,6	8,5	1,7	557,77
5	50,58	8,5	0,9	386,94
TOTAL	158,28	40,3	9,0	2079,37

Fuente: Autores

#### 11.4. EFICIENCIA DEL SISTEMA

Por otra parte, se determinó la eficiencia del sistema (% de remoción), con base en los resultados de DBO<sub>5</sub> de los muestreos realizados, los cuales se pueden ver en la tabla 18.

Tabla 18. Porcentaje de remoción del sistema

FECHA	DBO <sub>5</sub> (mg O <sub>2</sub> /L)		% REMOCIÓN
	ENTRADA	SALIDA	
Año 2016	3690	35	99,05
Año 2017	2990	184	93,85
21/11/2017	2010	300	85,07
14/12/2017	3140	569	81,88
25/01/2018	12164	231	98,10

Fuente: Autores

Además, se realizó la relación de DBO/DQO para comprobar la biodegradabilidad para cada laguna; los resultados se muestran a continuación:

Tabla 19. Relación de biodegradabilidad de las lagunas

PUNTO DE MUESTREO	DBO <sub>5</sub> (mgO <sub>2</sub> /L)	DQO (mgO <sub>2</sub> /L)	DBO5/DQO
P1	2010	11552	0,174
P2	336	5504	0,061
P3	281	4544	0,062
P4	527	5024	0,105
P5	1088	7744	0,140
P6	434	5024	0,086
P7	300	5760	0,052

Fuente: Autores

## 11.5. VERIFICACIÓN DE CARGAS ORGÁNICAS

Las cargas orgánicas teóricas medidas en términos de DBO, a la entrada y salida de cada laguna, son las siguientes:

Tabla 20. Cargas orgánicas teóricas

TIPO DE LAGUNA	T (°C)	DBO <sub>5</sub> Entrada (mg/L)	% Remoción	DBO Salida (mg/L)
Anaerobia 1	19	2010,00	58	844,20
Anaerobia 2	19	844,20	58	354,56
Anaerobia 3	19	354,56	58	148,92
Anaerobia 4	19	148,92	58	62,55
TIPO DE LAGUNA	T (°C)	DBO <sub>5</sub> Entrada (mg/L)	K(días <sup>-1</sup> )	DBO Salida (mg/L)
Facultativa 1	22,5	62,545	0,127	49,45
Facultativa 2	21	49,452	0,113	37,68
Facultativa 3	23	37,682	0,133	26,78
Facultativa 4	23	26,776	0,133	20,05
Facultativa 5	22,5	20,052	0,127	15,37

Fuente: Autores

## 11.6. LAGUNAS ANAEROBIAS

A partir de los datos recaudados de la laguna anaerobia se determinó la carga orgánica volumétrica según la ecuación 5. Los que los datos resultantes se muestran a continuación:

Tabla 21. Carga orgánica volumétrica, laguna anaerobia.

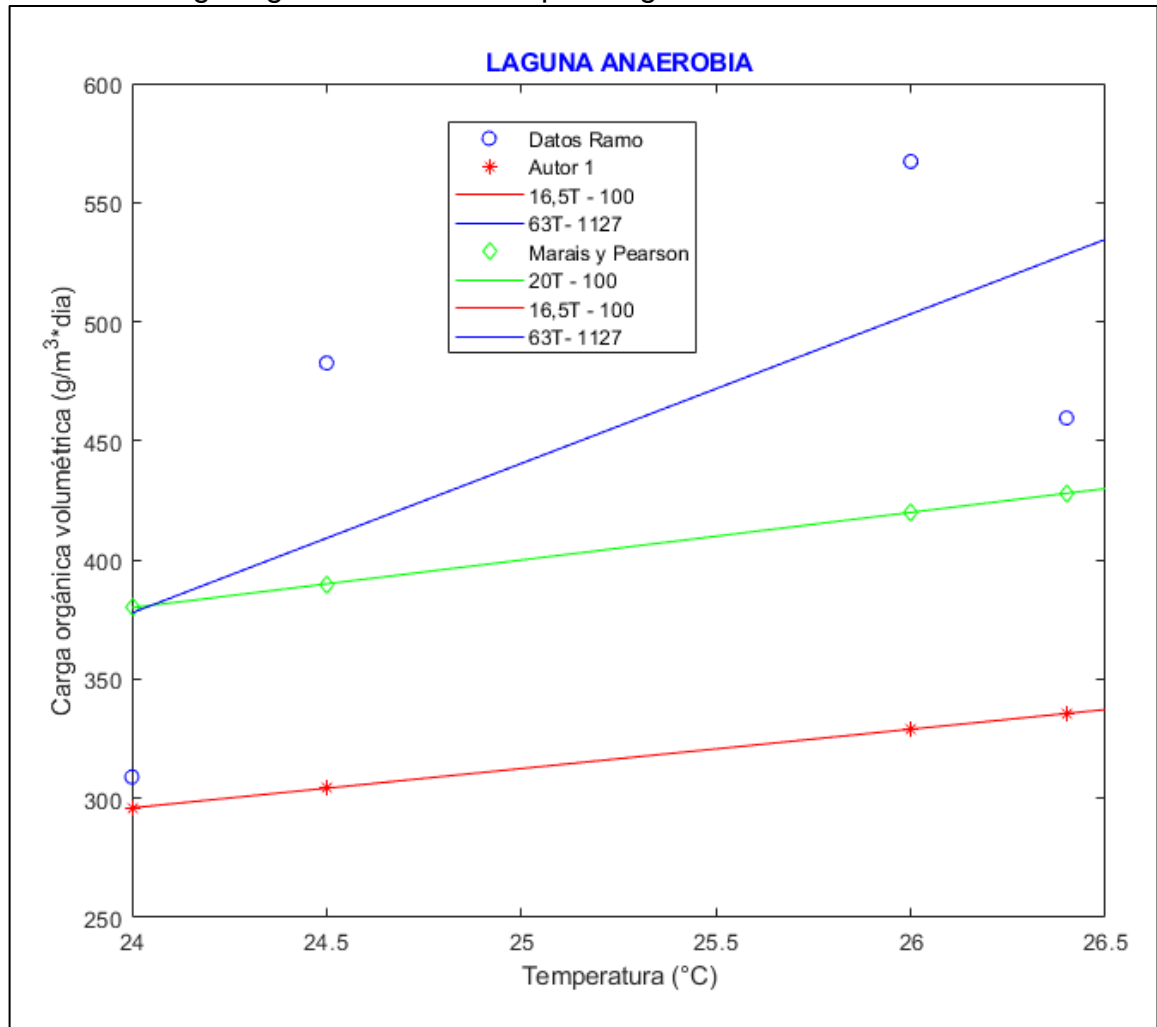
FECHA	DBO <sub>5</sub> (gO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> )	VOLUMEN (m <sup>3</sup> )	COV (g/ m <sup>3</sup> *día)	T (°C)
1/06/2016	2990	2079,37	459,62	26.4
1/06/2017	3690	2079,37	567,23	26
21/11/2017	2010	2079,37	308,98	24
14/12/2017	3140	2079,37	482,68	24.5
25/02/2018	12164	2079,37	1869,84	24

Fuente: Autores

Posteriormente, se graficaron los datos hallados en la tabla 21, con el fin de establecer una ecuación que relacione la temperatura y la carga orgánica volumétrica; en donde se desestimó el dato correspondiente a la fecha del 25 de

febrero de 2018, debido a la incongruencia que presentaba con los demás datos. Dicha gráfica se muestra a continuación:

Gráfica 1. Carga orgánica volumétrica para lagunas anaerobias



Fuente: Autores

La gráfica azul representa la ecuación 22, para determinar la COV en función de la temperatura en la Sabana de Bogotá.

$$COV = 63T - 1127$$

Ecuación 22.  
Carga Orgánica  
Volumétrica para  
lagunas  
anaerobias

Donde:

COV: Carga Orgánica Volumétrica, g/m<sup>3</sup>-día  
 T: Temperatura, °C

## 11.7. LAGUNAS FACULTATIVAS

### 11.7.1. MODELO DE FLUJO PISTÓN Y MEZCLA COMPLETA

Se determinó la tasa de remoción de primer orden (K), mediante los modelos de flujo pistón (ecuación 12) y mezcla completa (ecuación 7) para cada muestra, como se muestra a continuación:

Tabla 22. Coeficiente K mediante flujo pistón y mezcla completa (21/11/17)

LAGUNA FACULTATIVA - 14/12/17					
LAGUNA Nº	DBO <sub>5</sub> ENTRADA (mgO <sub>2</sub> /L)	DBO <sub>5</sub> SALIDA (mgO <sub>2</sub> /L)	TRH (días)	K F. Pistón (días <sup>-1</sup> )	K M.C. (días <sup>-1</sup> )
1	336	281	1,85	0,097	0,106
2	281	527	2,41	-0,261	-0,193
3	527	1088	2,58	-0,281	-0,200
4	1088	434	2,18	0,421	0,691
5	434	300	2,09	0,177	0,214

Fuente: Autores

Tabla 23. Coeficiente K mediante flujo pistón y mezcla completa (14/12/17)

LAGUNA FACULTATIVA - 21/11/17					
LAGUNA Nº	DBO <sub>5</sub> ENTRADA (mgO <sub>2</sub> /L)	DBO <sub>5</sub> SALIDA (mgO <sub>2</sub> /L)	TRH (días)	K F. Pistón (días <sup>-1</sup> )	K M.C. (días <sup>-1</sup> )
1	258	892	1,85	-0,672	-0,385
2	892	697	2,41	0,102	0,116
3	697	526	2,58	0,109	0,126
4	526	590	2,18	-0,053	-0,050
5	590	569	2,09	0,017	0,018

Fuente: Autores

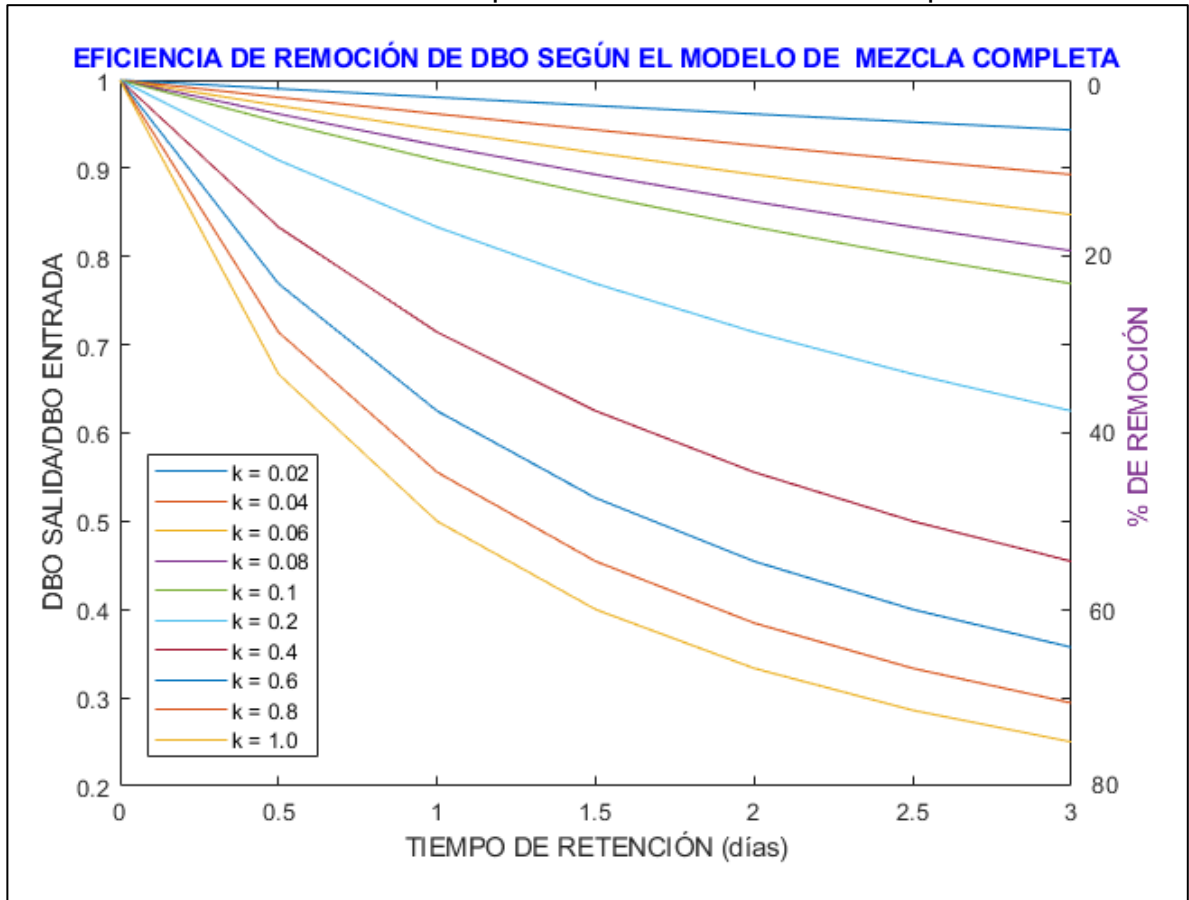
Tabla 24. Coeficiente K mediante flujo pistón y mezcla completa (25/01/18)

LAGUNA FACULTATIVA - 25/01/18					
LAGUNA Nº	DBO <sub>5</sub> ENTRADA (mgO <sub>2</sub> /L)	DBO <sub>5</sub> SALIDA (mgO <sub>2</sub> /L)	t(días)	K F. Pistón (días <sup>-1</sup> )	K M.C. (días <sup>-1</sup> )
1	1159	1133	1,85	0,012	0,012
2	1133	294	2,41	0,559	1,183
3	294	215	2,58	0,121	0,143
4	215	243	2,18	-0,056	0,053
5	243	231	2,09	0,024	0,025

Fuente: Autores

Además, con base en la ecuación 7, se obtuvo la gráfica de remoción de DBO según el modelo de mezcla completa (Gráfica 2). Se calculó la relación del efluente-influente ( $C/C_0$ ), asignando valores al tiempo de retención (TRH) y a los coeficientes de remoción (K), diferentes a los hallados mediante el método analítico, pero entre los mismos rangos para poder realizar la respectiva comparación. La gráfica obtenida es la siguiente:

Gráfica 2. Eficiencia de remoción para el modelo de mezcla completa



Fuente: Autores

Al interpretar en la gráfica anterior los valores de las constantes de remoción (K), se obtienen los siguientes resultados:

Tabla 25. Coeficientes de remoción con el método gráfico

LAGUNA	MUESTREO 1		MUESTREO 2		MUESTREO 3		PROMEDIO
	C/C <sub>o</sub>	K	C/C <sub>o</sub>	K	C/C <sub>o</sub>	K	
1	0,84	0,13	3,46	-	0,98	0	0,13
2	1,88	-	0,78	0,10	0,26	1	0,55
3	2,06	-	0,75	0,13	0,73	0,16	0,15
4	0,40	0,80	1,12	-	1,13	-	0,80
5	0,69	0,24	0,96	0	0,95	0	0,24
PROMEDIO							0,37

Fuente: Autores

### 11.7.2. MODELO DE FLUJO ARBITRARIO O DISPERSO

Se determinó la constante de reacción de primer orden usando las ecuaciones propuestas por Wehner, Wilhelm y Polprasert (1958); para un flujo con dispersión (ecuación 8 y 9).

Tabla 26. Constante (K) para para flujo arbitrario (14/12/17)

LAGUNA FACULTATIVA - 14/12/17						
Laguna	C/Co	d (Sáenz)	a (Sáenz)	d (Polprasert)	a (Polprasert)	K (días <sup>-1</sup> )
1	0,836	0,0001	N.D.	0,005	1,002	0,097
2	1,875	0,0002	N.D.	0,004	0,832	-7,229
3	2,065	0,0002	N.D.	0,003	1,012	0,758
4	0,399	0,0002	N.D.	0,003	0,881	-7,380
5	0,691	0,0001	N.D.	0,007	1,005	0,177
PROMEDIO						0,344

Fuente: Autores

Tabla 27. Constante (K) para para flujo arbitrario (21/11/17)

LAGUNA FACULTATIVA - 21/11/17						
Laguna	C/Co	d (Sáenz)	a (Sáenz)	d (Polprasert)	a (Polprasert)	K (días <sup>-1</sup> )
1	3,457	0,0001	N.D.	0,005	4,9,E+13	6,8,E+28
2	0,781	0,0002	N.D.	0,004	1,002	0,102
3	0,755	0,0002	N.D.	0,003	1,002	0,109
4	1,122	0,0001	N.D.	0,003	0,999	-0,053
5	0,964	0,0002	N.D.	0,007	1,000	0,017
PROMEDIO						0,076

Fuente: Autores

Tabla 28. Constante (K) para para flujo arbitrario (25/02/18)

<b>LAGUNA FACULTATIVA - 25/02/18</b>						
<b>Laguna</b>	<b>C/Co</b>	<b>d (Sáenz)</b>	<b>a (Sáenz)</b>	<b>d (Polprasert)</b>	<b>a (Polprasert)</b>	<b>K (días<sup>-1</sup>)</b>
1	0,978	0,0001	N.D.	0,005	1,000	0,012
2	0,259	0,0002	N.D.	0,004	0,873	-5,564
3	0,731	0,0002	N.D.	0,003	1,002	0,122
4	1,130	0,0002	N.D.	0,003	0,999	-0,056
5	0,951	0,0002	N.D.	0,007	1,001	0,024
PROMEDIO						0,053

Fuente: Autores

## 12. ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 12.1. EFICIENCIA DEL SISTEMA

Como se puede observar en la Tabla 18, el porcentaje de remoción del sistema varía de 81,88% a 99,05%, lo que indica que el sistema tiene una alta eficiencia en la remoción de la DBO; además, al realizar el mismo procedimiento en términos de DQO se obtiene un porcentaje de 50,14%. Sin embargo, al calcular la eficiencia de remoción de carga contaminante para cada laguna, como se observa en la Tabla 29; se obtuvo que las lagunas facultativas no están cumpliendo con la eficiencia mínima de remoción de DBO, la cual es del 80% al 90% según la resolución 0330 de 2017 (Artículo 184, tabla 29). El porcentaje máximo de remoción que se alcanza es de 74% (laguna N° 2 del tercer muestreo) y además, se presentan valores negativos debido al incremento de DBO<sub>5</sub> en algunos puntos del sistema, dicha inconsistencia será explicada más adelante.

Por otra parte, el conjunto de las lagunas anaerobias tiene una eficiencia de remoción alta (entre 83% y 92%), por lo que según la resolución se estaría cumpliendo con la remoción mínima de DBO<sub>5</sub>, valorada para lagunas anaerobias en un porcentaje de 40% a 50% de remoción.

Tabla 29. Porcentajes de remoción para lagunas anaerobias y facultativas

<b>LAGUNA</b>	<b>% MUESTREO 1</b>	<b>% MUESTREO 2</b>	<b>% MUESTREO 3</b>
Anaerobia	83	92	90
Facultativa 1	16	-246	2
Facultativa 2	-88	22	74
Facultativa 3	-106	25	27
Facultativa 4	60	-12	-13
Facultativa 5	31	4	5

Fuente: Autores

Como se aprecia en la Tabla 30, en algunos puntos la DBO aumenta, lo que se genera posiblemente, a vertimientos adicionales en las lagunas posteriores de agua residual o presencia de capa vegetal en la superficie de la laguna.



Tabla 30. Valores de DBO<sub>5</sub> en los diferentes puntos de muestreo

Punto de Muestreo	DBO <sub>5</sub> (mg/L)		
	Muestreo 1	Muestreo 2	Muestreo 3
P1	2010	3140	12164
P2	336	258	1159
P3	281	892	1133
P4	527	697	294
P5	1088	526	215
P6	434	590	243
P7	300	569	231

Fuente: Autores

Otra causa puede ser el mal uso del tipo de tratamiento que se implementa, puesto que el agua residual no cuenta con las características adecuadas para realizar un tratamiento biológico. Como se puede detallar la Tabla 19, la relación que existe entre DBO y DQO es inferior a lo requerido, en todos los puntos de muestreo, ya que esta relación debe ser como mínimo de 0.5 para utilizar un tratamiento biológico, pero en el caso de las lagunas se encuentra en un rango de 0,06 a 0,15. Lo anterior, se debe a que la carga orgánica no biodegradable es alta y presenta una diferencia apreciable en comparación con la carga orgánica biodegradable.

“La DQO se divide en 2 grupos: DQO biodegradable total y DQO no biodegradable total o inerte. A su vez, la fracción biodegradable se subdivide en DQO rápidamente biodegradable, y DQO lentamente biodegradable; mientras que la fracción no biodegradable total se subdivide en DQO soluble inerte y DQO articulada inerte”<sup>77</sup>. Según SIERRA<sup>78</sup>, la fracción rápidamente biodegradable es depurada fácilmente por los microorganismos; sin embargo, la fracción lentamente biodegradable “debe ser primero absorbida sobre la estructura celular de los microorganismos que la hidrolizan a unidades químicas simples, utilizando enzimas extracelulares y finalmente, es metabolizada por ellos”<sup>79</sup>. Por otra parte, la DQO no biodegradable no puede ser removida mediante la actividad biológica, y mientras una parte saldrá del sistema, la otra se convertirá en lodo que se ubicará en el fondo de los reactores.

Según lo anterior, al ser la DQO elevada los microorganismos se tardan más en la degradación de la materia orgánica más compleja, que compone un porcentaje de la DQO (materia lentamente biodegradable), la cual requiere más tiempo para que sea depurada; ya que los microorganismos no tienen la capacidad para tratar el

<sup>77</sup> SIERRA, María, et al. Biodegradabilidad de las diferentes fracciones de agua residual producidas en una tenería. En: Ciencia e Ingeniería Neogranadina. Diciembre, 2010. Tomo 21, no 2,p.7-8.

<sup>78</sup> *Ibíd*, p.8.

<sup>79</sup> *Ibíd*, p.8.

agua con esas características, al estar sobrecargados tratando de absorber los compuestos más complejos. Además, la otra fracción no degradable que compone la DQO, elude el sistema de tratamiento o se convierte en lodos. En estos casos, Cisterna<sup>80</sup> recomienda realizar un tratamiento físico-químico preliminar, para tratar estas sustancias.

Como se explicó anteriormente, las lagunas no están actuando de la manera adecuada, por lo que resulta importante hallar la carga orgánica (medida en términos de DBO) que debería garantizar este sistema. Los valores teóricos y reales están consignados en la tabla 31.

Tabla 31. Comparación entre la DBO salida teórica y práctico

DBO SALIDA (mg/L)						
TIPO DE LAGUNA	Anaerobia	Facultativa 1	Facultativa 2	Facultativa 3	Facultativa 4	Facultativa 5
TEÓRICO	62,55	49,45	37,68	26,78	20,05	15,37
21/11/2017	336	281	527	1088	434	300
AUMENTO	81%	82%	93%	98%	95%	95%
14/12/2017	258	892	697	526	590	569
AUMENTO	76%	94%	95%	95%	97%	97%
25/01/2018	1159	1133	294	215	243	231
AUMENTO	95%	96%	87%	88%	92%	93%

Fuente: Autores

Así, se observa que en todos los casos la DBO de salida práctica es superior a la teórica. En el caso de la laguna anaerobia hay un aumento en el primero, segundo y tercer muestreo del 81%, 76% y 95%, respectivamente. De igual manera, este incremento se presenta en la laguna facultativa; por ejemplo, a la salida de la laguna número cinco se presenta una variación del 95% para el muestreo uno, 97% para el muestreo dos y 93% para el muestreo tres.

A pesar de la inconsistencia en los valores de los parámetros físico-químicos y biológicos, a lo largo del sistema de tratamiento; este cumple con lo establecido en la resolución 0631 de 2015, la cual indica que el valor máximo admisible para los vertimientos generados a partir de la elaboración de productos alimenticios para la DBO<sub>5</sub> y DQO son de 400 y 600 mg/L, respectivamente; además de cumplir con un pH entre 6 y 9 unidades.<sup>81</sup> A pesar de ello, se recomienda que los valores de pH

<sup>80</sup> CISTERNA, Pedro. Texto [en línea]. Determinación de la relación DQO/DBO<sub>5</sub> en aguas residuales de comunas con población menor a 25.000 habitantes en la VIII región. S.L, S.F., [Citado el: 19 de abril de 2018.] Disponible en Internet: <<http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/chile13/trab-12.pdf>>

<sup>81</sup> COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Resolución 0631(17, marzo, 2015). Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos

se encuentren entre 6 a 8 <sup>82</sup>, puesto que un valor fuera de este rango se reflejaría en olores fuertes (pH menor a 6) o en la desaparición de la capa bacteriana encargada de la remoción de materia orgánica (pH mayor a 9).

Tabla 32. Valores de la DBO<sub>5</sub>, DQO y pH al final del tratamiento

FECHA	VALORES REALES (mg/L)			VALORES MÁXIMOS ADMISIBLES		
	DBO <sub>5</sub> SALIDA (mg/L)	DQO SALIDA (mg/L)	pH	DBO <sub>5</sub>	DQO	pH
Año 2016	35	109	6,93 – 7,44	400 mg/L	600 mg/L	6 - 9
Año 2017	184	272	7,60 – 8,81			
21/11/2017	300	5760	7			
14/12/2017	569	569	7,9			
25/01/2018	231	231	7,5			

Fuente: Autores

Como se puede apreciar en la tabla 32, en el segundo muestreo (realizado el 14 de diciembre de 2017) el vertimiento no cumple con el parámetro de DBO<sub>5</sub> y DQO, ya que la carga orgánica biodegradable sobrepasa en un 42,25% el valor de 400 mg/L y la carga orgánica no degradable total en un 361,5 % el valor de 600 mg/L; sin embargo, los otros valores de DBO y DQO cumplen con lo establecido en la resolución. Por otra parte, los valores del pH para el efluente cumplen, ya que tienen valores de 6,93 a 8,81 unidades de pH y se encuentran dentro del rango anteriormente mencionado.

## 12.2. LAGUNA ANAEROBIA

En la Gráfica 1, se puede apreciar que existe una dispersión de los datos, que da como resultado un coeficiente de correlación de Pearson bajo ( $R = 0,5$ ). Esto se generó a causa de la inconsistencia de los valores de DBO obtenidos, que se generaron por deficiencias del sistema como ya se había mencionado. Lo anterior indica que la ecuación no se ajusta, es decir, las variables (Carga Orgánica Volumétrica y Temperatura) no tienen una dependencia total; por lo tanto, no representan la realidad de la remoción de carga orgánica en función de la temperatura.

Yáñez<sup>83</sup> recomienda que tengan una profundidad de 2,5 m a 5,0 m, sin embargo, durante el diseño se establecieron profundidades de 1,7 m a 2,25 m para las

puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones. Bogotá: El ministerio, 2015.p. 14.

<sup>82</sup> MARTÍNEZ, Lucero. Texto En línea. Estudio de la evolución de una ETAP para la adecuación legislativa. Universidad Politécnica de Catalunya. Junio de 2010. Citado el 22 de marzo de 2018. Disponible en internet: <<https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/10383/Annex.pdf?sequence=3&isAllowed=y>>

lagunas anaerobias; las cuales claramente son insuficientes. Además, La Comisión Nacional Del Agua<sup>84</sup> asegura que la sedimentación de lodos es alrededor del 20 al 30 por ciento de la DBO del influente, lo cual reduce aún más la profundidad. La disminución en este parámetro reduce el volumen, y con ello el tiempo de detención lo que ocasiona que se limite el efecto de los microorganismos en la depuración de las aguas.

Según lo anterior, las lagunas están sobrecargadas ya que están asimilando la carga orgánica con un volumen menor. Teniendo en cuenta que el volumen es inversamente proporcional a la carga orgánica volumétrica, la disminución de este provoca que la gráfica tenga una pendiente creciente, mayor a la establecida por otros autores como la propuesta por Marais y Pearson ( $COV = 20T-100$ ).

### **12.3. LAGUNA FACULTATIVA**

Los análisis de laboratorio de los tres muestreos realizados en este tipo de lagunas, revelaron que existe un aumento de la carga orgánica en lugar de disminuir, como se observa en la Tabla 30. Este aumento de la carga orgánica generó valores negativos de la constante K, para los diferentes modelos de flujo. Por este motivo fueron desestimados ya que se asimilan los datos obtenidos de las lagunas que, se presume trabajan correctamente.

Lo anterior, es una deficiencia en el sistema ocasionada posiblemente, por materia vegetal flotante observada en el lugar (ver figura 15) que ocasionaría un déficit de radiación solar en la zona superior; lo que en consecuencia, reduce el proceso fotosintético, lo cual es necesario para el correcto funcionamiento de este tipo de lagunas.

---

<sup>83</sup> Yáñez, Fabián. Lagunas de estabilización. Op. Cit. p.73.

<sup>84</sup> COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA, Diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales: Lagunas de Estabilización. Op. cit., 49.

Figura 15. Laguna facultativa con materia vegetal



Fuente: Autores

Además, las profundidades están entre 0,62 metros y 0,93 metros (ver Tabla 15) y son bajas, en comparación con los rangos establecidos para su correcto funcionamiento (profundidad de 1,5 m a 2,0 m); lo que puede ayudar a la aparición de vegetación que disminuye la eficiencia de la laguna. Según Lampoglia<sup>85</sup>, esto pudo ser causado, por una posible infiltración o aportes externos a través del fondo o por los diques divisorios entre las lagunas.

Según Marais y Meiring, en la primera laguna facultativa la capa aeróbica debe ser predominante, y se espera que la concentración no supere la dada por la fórmula 15, la cual dió como resultado un valor de 64.795 mg/L. Así, al compararla con los valores reales (336, 258 y 1159 mg/L), se observa que las lagunas primarias tienen valores de carga orgánica, medida en términos de DBO, por encima de lo recomendado. De esta manera, se puede afirmar que en el inicio de estas no se está trabajando de forma mayoritariamente aeróbica, por lo que se necesitan más lagunas facultativas, como explica Romero<sup>86</sup>. Así, se corrobora que la implementación de lagunas en serie, en el lugar, es adecuado.

---

<sup>85</sup> LAMPOGLIA, Teresa. Texto [en línea]. Tratamiento de Desagües por Lagunas de Estabilización. Manual de Operación y Mantenimiento. PROAGUA. 2001. [Citado el: 22 de febrero de 2018.] Disponible en Internet: <[http://www.proagua.org.pe/files/216e50077167015dc8e024268ecac612/Manual\\_Operacion\\_Lagunas\\_de\\_Oxidacion.pdf](http://www.proagua.org.pe/files/216e50077167015dc8e024268ecac612/Manual_Operacion_Lagunas_de_Oxidacion.pdf)>

<sup>86</sup> ROMERO, Jairo. Lagunas de Estabilización de Aguas Residuales. Op. Cit. p.153.

$$C = \frac{600}{2D + 18} = 64.795 \text{ mg/L}$$

Ecuación 23.  
Remoción de carga orgánica para lagunas anaerobias

C: DBO del efluente de la laguna primaria, mg/L.  
D: profundidad de la laguna, m.

Tabla 33. Concentración de lagunas facultativas

CONCENTRACIÓN DEL EFLUENTE (mg/L)			
Teórico de Marais y Meiring	Muestreo 1	Muestreo 2	Muestreo 3
64,795	336	258	1159

Fuente: Autores

### 12.3.1. Modelo flujo pistón

A partir de la implementación del modelo de flujo pistón, partiendo de los datos de DBO en la entrada y salida; se determinaron las constantes de remoción como se muestra en la tabla 34. Asimismo, fueron calculadas a partir de las correlaciones de Marais y Gloyna mediante las cuales fueron obtenidas tasas de reacción promedio de 0,953 y 0,881 días<sup>-1</sup>, respectivamente.

Tabla 34. Constante cinética (K) promedio para flujo pistón

LAGUNA	K (días <sup>-1</sup> )	CONSTANTES TEÓRICAS		% VARIACIÓN	
		K Marais (días <sup>-1</sup> )	K Gloyna (días <sup>-1</sup> )	Marais	Gloyna
1	0,055	0,884	0,832	93,82	93,44
2	0,331	0,869	0,821	61,91	59,68
3	0,115	0,946	0,877	87,84	86,89
4	0,421	1,178	1,041	99,96	99,96
5	0,073	0,889	0,836	91,79	91,27
Promedio	0,199	0,953	0,881	79,12	77,41

Fuente: Autores

Como se puede observar, existe una dispersión en los valores de las constantes halladas mediante este modelo; sin embargo, el promedio de estas es menor a las encontradas mediante las ecuaciones de los autores previamente mencionados. Así, la constante de remoción promedio de 0,199 días<sup>-1</sup>, es menor y varía en un 79,12% y 77,41 % con respecto a las constantes de Marais y Gloyna, correspondientemente. Esto ocurre porque en el flujo pistón no se tiene en cuenta la temperatura, caso contrario de dichas ecuaciones. Es importante recordar que la degradación de DBO depende en gran medida de la actividad de los

microorganismos que a su vez, dependen de condiciones ambientales como la temperatura.

### 12.3.2. Modelo de mezcla completa

A partir de las correlaciones de Marais y Gloyna, en la que se determina la constante de remoción a partir de la temperatura del lugar; se halló la constante de remoción teórica, como se muestra en la Tabla 35. En esta se puede evidenciar que solo algunas tasas de remoción (K) halladas, tienen un porcentaje de variación bajo con respecto a los valores determinados mediante los modelos de dichos autores; lo que es el caso de la laguna 2 con porcentajes de variación del 25,27%, con respecto a Marais y 20,94% en comparación con Gloyna; asimismo, en la laguna 4 con porcentajes de variación de 41,35% y 36,70%, respectivamente.

Tabla 35. Constantes de remoción para mezcla completa

LAGUNA	CONSTANTES REALES	CONSTANTES TEÓRICAS		% VARIACIÓN	
	K (días <sup>-1</sup> )	K Marais (días <sup>-1</sup> )	K Gloyna (días <sup>-1</sup> )	Marais	Gloyna
1	0,059	0,884	0,832	93,29	92,87
2	0,649	0,869	0,821	25,27	20,94
3	0,134	0,946	0,877	85,79	84,68
4	0,691	1,178	1,041	41,35	36,70
5	0,085	0,889	0,836	90,39	89,78
PROMEDIO	0,324	0,953	0,881	67,22	64,38

Fuente: Autores

Finalmente, el porcentaje de variación es de 67,22% en el caso de Marais y 64,38% para Gloyna; con respecto a la constante (K) real promedio, la cual es de 0,324 días<sup>-1</sup>. En consecuencia, se presume que las variables de la zona de estudio afectan el coeficiente de remoción de manera directa, por lo que implementar valores establecidos por otros autores, en el diseño de lagunas representaría un desfase en el dimensionamiento de la misma. Teniendo en cuenta lo anterior y observando en la Tabla 35, que todos los valores de las constantes reales son menores en relación con las teóricas, se cree que la remoción de materia orgánica biodegradable es más lenta; como muestra de ello, la constante real de 0,324 días<sup>-1</sup> es inferior a 0,953 días<sup>-1</sup> y 0,881 días<sup>-1</sup> referente a Marais y Gloyna, respectivamente. Lo anterior se ve reflejado en la ecuación 7, ya que a una menor tasa de remoción la concentración del efluente es mayor lo que traduce en la implementación de una mayor cantidad de lagunas de estabilización o más grandes.

Al analizar la Gráfica 2, se evidencia que al presentarse una relación de DBO (efluente/ afluente) es mayor a uno, no es posible determinar el valor de K, puesto que no se encuentra dentro del rango de la gráfica; sin embargo, se esperaría que los valores fueran negativos. Lo anterior, ocurre porque los resultados demuestran que se está realizando el proceso inverso, es decir, está aumentando la carga orgánica como ya se había mencionado anteriormente.

Asimismo, al seleccionar los valores de las constantes interpretadas en la gráfica y promediar dichos valores, el resultado de k es de  $0,37 \text{ días}^{-1}$  para el modelo de mezcla completa. Este valor se acerca al calculado con las ecuaciones para el mismo patrón de flujo, el cual fue de  $0,324 \text{ días}^{-1}$ ; sin embargo, difieren significativamente en comparación con los valores de Marais, que planteó un coeficiente de remoción igual a  $0,17 \text{ días}^{-1}$  con una temperatura a  $20^\circ \text{ C}$  como explica Yáñez<sup>87</sup>. Para la misma temperatura, Gloyna señala que el coeficiente (k) es de  $0,35 \text{ días}^{-1}$ , el cual se asemeja más al resultado hallado mediante este flujo, tanto en el método analítico como gráfico.

### **12.3.3. Modelo de flujo arbitrario o disperso**

Inicialmente se calculó el número de dispersión (d) con la ecuación propuesta por Sáenz en 1985 (Ecuación 11); sin embargo, estos valores tienden a cero por lo que no es posible calcular el valor de la constante a de la ecuación 9. Los valores de la constante d, indican que este flujo se comportaría como flujo pistón y no como flujo disperso, como señala Romero<sup>88</sup>. Finalmente, los valores de K calculados con las ecuaciones de Wehner, Wilhelm y Polprasert (Ecuación 10); para cada laguna en los 3 muestreos, se puede ver en la tabla 26,27 y 28.

Al realizar el procedimiento en la hoja de cálculo mediante iteración usando las ecuaciones de Wehner, Wilhelm y Polprasert; no fue posible establecer con certeza algunos valores de la constante, usada en la Ecuación 9, puesto que el programa indicó que no se pudo haber encontrado una solución. Se determinó que este fue el caso de la constante a de las lagunas 3 y 4 del primer muestreo con valores de 1,01 y 0,88, respectivamente; para la laguna número 1 del segundo muestreo que arrojó un valor de  $4,87 \times 10^{-13}$ ; y la laguna número 3 para el tercer muestreo, con una constante de 0,87. Además, los valores de la laguna número 2 del primer muestreo, la número 4 del segundo y la laguna número 2 y 4 del tercer muestreo; generaron valores negativos en el coeficiente de reacción. Es importante resaltar que tanto las constantes a, como los coeficientes, que se presumen son erróneas, fueron desestimadas para definir el coeficiente de remoción definitivo. Así, el valor promedio del coeficiente de remoción (K) para flujo disperso es de  $0.140 \text{ días}^{-1}$ , sin embargo, el resultado no es concluyente

<sup>87</sup> YÁÑEZ, Fabián. Lagunas de estabilización. Op. Cit. p.83..

<sup>88</sup> ROMERO, Jairo. Lagunas de Estabilización de Aguas Residuales. Op. Cit. p.155.



puesto que la constante  $d$  indicaría que el flujo hidráulico predominante es de tipo pistón, por lo que no es representativa para la  $K$  de flujo disperso.

Tabla 36. Resultados de los coeficientes de remoción ( $K$ ) para los 3 patrones de flujo

LAGUNA	CONSTANTE $K$ (días <sup>-1</sup> )				
	Mezcla completa	Flujo pistón	Flujo disperso	Marais	Gloyna
1	0,059	0,055	0,055	0,375	0,850
2	0,649	0,331	0,102	0,368	0,833
3	0,134	0,115	0,330	0,407	0,921
4	0,691	0,421	-	0,531	1,197
5	0,085	0,073	0,073	0,378	0,856
PROMEDIO	0,324	0,199	0,140	0,953	0,881

Fuente: Autores

### 13. CONCLUSIONES

En primer lugar, se realizó la recopilación de información del sistema de tratamiento de agua residual de Productos Ramo, conformada por lagunas de estabilización. Se efectuaron 3 muestreos los días 21 de noviembre de 2017, 14 de diciembre de 2017 y 25 de enero de 2018, para un total de 21 muestras; que se recolectaron a la entrada y salida de cada una de las lagunas facultativas, así como del conjunto de lagunas anaerobias. Posteriormente, las muestras fueron analizadas en un laboratorio ambiental acreditado por la autoridad competente, para determinar la Demanda Bioquímica de Oxígeno ( $DBO_5$ ), en los 3 muestreos; y la Demanda Química de Oxígeno (DQO), en el primer muestreo. También, se realizaron análisis de algunos parámetros físico-químicos en el laboratorio de la Universidad Católica de Colombia. Además, se obtuvieron valores de parámetros biológicos Y físico-químicos ( $DBO_5$  Y DQO) y características dimensionales del sistema (largo, ancho y profundidad de las lagunas) de las caracterizaciones realizadas por empresa y las memorias de diseño, las cuales fueron proporcionadas por la empresa.

En segundo lugar, las lagunas que componen el sistema de tratamiento de Productos Ramo, efectúan la remoción de  $DBO_5$  del 81.88% a 99,05%; sin embargo, al realizar el análisis de cada laguna se encontró que el conjunto de lagunas anaerobias tienen una eficiencia de remoción que oscila entre el 83% y 82%. Por el contrario, en algunos puntos de las lagunas facultativas se presentan inconsistencias ya que el valor de la carga orgánica, medida en función de la  $DBO_5$ , aumenta en vez de disminuir; lo que demuestra que existen falencias en el proceso de tratamiento biológico, posiblemente a una operación y mantenimiento inadecuado del sistema. Además, la relación entre la  $DBO_5$  y la DQO en todos los casos es inferior a 0.5, que es lo que se esperaría en un proceso de tratamiento biológico. Lo anterior, debido a que las lagunas presentan más materia no biodegradable que materia biodegradable. Por lo que es recomendable usar un tratamiento preliminar a las lagunas. A pesar de ello, el sistema cumple con lo reglamentado por la resolución 0631 de 2015 para vertimientos en cuerpos de agua superficiales.

La estimación del funcionamiento del sistema de lagunas demuestra que la  $DBO_5$  de salida real es superior a la teórica. Una muestra de ello, es que en la laguna anaerobia hay un aumento en el primer, segundo y tercer muestreo de 81%, 76% y 95%, respectivamente. De igual manera, este incremento se presenta en la laguna facultativa; por ejemplo, a la salida de la laguna número cinco se presenta una variación del 95% para el muestreo uno, 97% para el muestreo dos y 93% para el muestreo tres, de la carga orgánica real con respecto a la teórica.

Por último, se calcularon coeficientes cinéticos de remoción para los 3 patrones de flujo hidráulico. En el caso de flujo pistón el coeficiente de remoción (K) es de  $0,199 \text{ días}^{-1}$  y varía en un 79,12% y 77,41 %, con respecto a las de Marais y Gloyna que tienen unas constantes teóricas de  $0,953 \text{ días}^{-1}$  y  $0,881 \text{ días}^{-1}$ , respectivamente. Posteriormente, se determinó que la constante de reacción (K) mediante mezcla completa es de  $0,324 \text{ días}^{-1}$ , la cual difiere en un 67,22% y 64,38% de los evaluados a través de las expresiones de Marais y Gloyna. Además, la constante para flujo disperso es de  $0,14 \text{ días}^{-1}$ , pero no refleja el comportamiento cinético de remoción de las lagunas puesto que el número de dispersión (d) señala que el flujo predominante es pistón.

Las constantes halladas son menores a las encontradas mediante las ecuaciones de los autores previamente mencionados, con lo que se demuestra que los valores de los coeficientes cinéticos (K), difieren en comparación con los que se usan actualmente, y que fueron determinados con estudios realizados en zonas con climas diferentes a los que se presenta en la Sabana de Bogotá. Lo anterior, demuestra que el estudio podría ser asertivo, debido a que la variación presentada es significativa.

## 14. RECOMENDACIONES

Se recomienda efectuar muestreos compuestos en diferentes momentos del año con el fin de que estos sean representativos de las condiciones climáticas y así, tener coeficientes que se ajusten más a la realidad de las lagunas facultativas; además de un mejor ajuste de la gráfica de carga orgánica volumétrica para lagunas anaerobias.

Por otra parte, se sugiere hacer un ajuste de la ecuación propuesta por Arceivala (1970), para determinar la carga orgánica superficial en función de la latitud. Para lo cual debe analizarse la  $DBO_5$  en diferentes lagunas ubicadas en distintas latitudes, con el fin de realizar la correspondiente correlación.

Se aconseja establecer ecuaciones para determinar los coeficientes de reacción, que involucren la temperatura, cargas orgánicas, tiempo de retención, profundidad y radiación solar; debido a que dichos factores influyen significativamente el valor de la constante.

Es recomendable realizar el estudio en instalaciones de tratamiento de aguas, conformadas por lagunas de estabilización, que presenten un funcionamiento óptimo, para que así los coeficientes de remoción ( $K$ ) determinados tengan una mayor exactitud.

## BIBLIOGRAFÍA

ASSUMPTION UNIVERSITY OF THAILAND. Design and Performance Evaluation of a Wastewater Treatment Unit. [en línea]. Thailand. [Citado 10 Septiembre, 2017]. Disponible en Internet : < URL: [http://www.journal.au.edu/au techno/2006/jan06/vol9num3\\_article11.pdf](http://www.journal.au.edu/au techno/2006/jan06/vol9num3_article11.pdf)>

BIORESOURCE TECHNOLOGY. Reaction coefficient (K) evaluation for full-scale facultative pond systems. Brasilia. Mayo, 2001, Vol. 78, no 1.

CISTERNA, Pedro. Texto [en línea]. Determinación de la relación DQO/DBO5 en aguas residuales de comunas con población menor a 25.000 habitantes en la VIII región. S.L, S.F., [Citado el: 19 de abril de 2018.] Disponible en Internet: <<http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/chile13/trab-12.pdf>>

COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Resolución 0631(17, marzo, 2015). Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones. Bogotá: El ministerio, 2015.p. 14.

COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA. Diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales: Lagunas de Estabilización. CNA. México. D.F., 2017. p.55 - 62.

COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA. Manual de Agua Potable Alcantarillado y Saneamiento: Lagunas de estabilización. CNA. México. D.F., 2007. p. 7, 20, 21, 37.

CORREA, Gloria. Evaluación y monitoreo del sistema de lagunas de estabilización del municipio de Santa fé de Antioquia, Colombia. {En línea}, Medellín, 2008, Consultado: 15 de abril de 2018, p.15. Trabajo de investigación (magíster en ingeniería). Universidad de Antioquia. Facultad de ingeniería. Disponible en <<http://tesis.udea.edu.co/bitstream/10495/50/1/EvalMonitStmaLagunasStfeAnt.pdf>>.

DAHL, N. WOODFIELD, P. A practical model for sunlight disinfection of a subtropical maturation pond. En: Water Research. Enero, 1995. Vol. 108., p. 151-159.

ECOLOGICAL ENGINEERING. Significance and estimation of oxygen mass transfer coefficient in Simulated waste stabilization pond. Mumbai. Diciembre, 2014, Vol. 73.

ELLIS, K. RODRIGUES, C. Verification of two design approaches for stabilization ponds. En: Water Research. Septiembre, 1993. Vol. 27. p. 1447-1454.

ESCALANTE, Violeta. MENDIOLA, Claudia. Texto [en línea]. Constantes cinéticas en lagunas de estabilización. Jiutepec (México): Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. [Citado el: 19 de abril de 2018.] Disponible en Internet:<<http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/aresidua/mexico/01062e14.pdf>>

ESTRADA, Violeta. MENDIOLA, Claudia. Constantes cinéticas en lagunas de estabilización. Jiutepec (México): Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

GIL-RODRIGUEZ, Manuel. Eliminación biológica de amonio y materia orgánica, {En línea}, Revista internacional de métodos numéricos para el cálculo y diseño en ingeniería, Vol. 22,4 (2006) p. 427-436. Disponible en línea: <<https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099/4771/22N4E.pdf>>.

HAMMEKEN, Alejandro y ROMERO, Eduardo. Análisis de una PTAR [en línea]. Puebla: Universidad de las Américas Puebla [citado 30 agosto, 2017]. Disponible en Internet. p 24.

LAMPOGLIA, Teresa. Texto [en línea]. Tratamiento de Desagües por Lagunas de Estabilización. Manual de Operación y Mantenimiento. PROAGUA. 2001. [Citado el: 22 de febrero de 2018.] Disponible en Internet: <[http://www.proagua.org.pe/files/216e50077167015dc8e024268ecac612/Manual\\_Operacion\\_Lagunas\\_de\\_Oxidacion.pdf](http://www.proagua.org.pe/files/216e50077167015dc8e024268ecac612/Manual_Operacion_Lagunas_de_Oxidacion.pdf)>

LASALLE. Resoluciones [en línea]. Bogotá: Ministerio de Medio Ambiente [citado 25 agosto, 2017]. Disponible en Internet: <<http://www.lasalle.edu.co/wps/wcm/connect/7bf35b9e-b9ac-45b3-a280-c7dec8b1499d/Resolucion+631-2015.pdf?MOD=AJPERES>>

LOTHAR, Max. Curso para ingenieros sobre operación y mantenimiento de lagunas para estabilización de aguas residuales: Lagunas para el tratamiento de desechos industriales. Lima: Proyecto de desarrollo tecnológico de las instituciones de abastecimiento de agua potable y alcantarillado (DTIAPA), 1980. p.1. [citado el 3 de septiembre de 2017] Disponible en: <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/scan2/011634/011634-II-01.pdf>

NORIEGA, Hugo. ESCALANTE, Violeta. Determinación de perfiles, constantes cinéticas y ecuaciones de diseño en una laguna facultativa. Jiutepec (México): Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

MARTÍNEZ, Lucero. Texto En línea. Estudio de la evolución de una ETAP para la adecuación legislativa. Universidad Politécnica de Catalunya. Junio de 2010. Citado el 22 de marzo de 2018. Disponible en internet:

<<https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/10383/Annex.pdf?sequence=3&isAllowed=y>>

MINISTERIO DE VIVIENDA CIUDAD Y TERRITORIO. Resolución 0330 de 2017, Bogotá, Ministerio de vivienda ciudad y territorio 2017, p. 124.

MOORE, Holly. Matlab para ingenieros. Pearson Educación, 2007. P.5-9

OROZCO, Álvaro. Bioingeniería de Aguas Residuales. 1 ed. Bogotá: Asociación Colombiana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, 2005. p. 31,11,19.

MORENO, María. Depuración por lagunaje de aguas residuales, Manual de operadores. Madrid. Ministerio de obras públicas y transporte, 1991. p.29, 55, 65, 66.

PARDO, Cristina y SALVADORES, María. Investigación Proyecto de Grado Organización RAMO S.A., Bogotá: Colegio de Estudios Superiores de Administración. Administración de Empresas. Proyecto de Grado, 2015. p. 6.

POLPRASERT, C. Significance of biofilm activity in facultative pond design and performance. En: Water Science and Technology.1995. Vol. 31, no. 12, p. 119–128.

PRODUCTOS RAMO S.A. Manual de Mantenimiento y Operación Serpentín Zona Franca de Occidente, 2017.

PRODUCTOS RAMO S.A., Memorias de cálculo del sistema de tratamiento. Productos Ramo S.A. Bogotá, 2015.

RAMALHO, R. S., Tratamiento de aguas residuales, Barcelona, Editorial Reverté S.A. 2003.p.10.

ROLIM, Sergio. Sistemas de Lagunas de Estabilización. 4 ed. Bogotá: McGraw-Hill Interamericana, 2000. p.69, 21, 129, 140.

ROMERO, Jairo. Lagunas de estabilización de aguas residuales. 1 ed. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería, 2005. p .13, 168, 27,129,140,21.

ROMERO, Jairo. Tratamiento de Agua Residuales. 3 ed. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería, 2000. p.201.

SAÉNZ, Rodolfo. Lagunas de estabilización y otros sistemas de simplificados para el tratamiento de aguas residuales. [Lima]. CEPIS, 1985.p.6,7,8.

SARACHO, M., RODRIGUEZ, N. Texto [en línea]. Eficiencia de las lagunas de estabilización de la ciudad de Catamarca y su relación con la estimada por los

modelos de diseño. Catamarca, Argentina. Universidad Nacional de Catamarca. [Citado el: 19 de abril de 2018.] Disponible en Internet:< <https://www.mendoza-conicet.gov.ar/asades/modulos/averma/trabajos/2006/2006-t001-a010.pdf>>

RASOUL, Khrosravi. TAHER, Shaharyari. Texto [en línea]. Kinetic analysis of organic matter removal in stabilization pond in the wastewater treatment plant of Birjand. Birjand. Birjand University of Medical Sciences. . [Citado el: 19 de abril de 2018.] Disponible en Internet:< [https://www.researchgate.net/publication/289481899\\_Kinetic\\_analysis\\_of\\_organic\\_matter\\_removal\\_in\\_stabilization\\_pond\\_in\\_the\\_wastewater\\_treatment\\_plant\\_of\\_Birjand](https://www.researchgate.net/publication/289481899_Kinetic_analysis_of_organic_matter_removal_in_stabilization_pond_in_the_wastewater_treatment_plant_of_Birjand)>

SIERRA, María, et al. Biodegradabilidad de las diferentes fracciones de agua residual producidas en una tenería. En: Ciencia e Ingeniería Neogranadina. Diciembre, 2010. Tomo 21, no 2, p.7-8.

SOARES, S. BERNANDES, R. Reaction coefficient (K) evaluation for full-scale facultative pond systems. En: Bioresource Technology. Mayo, 2001. Vol. 78. no. 1, p. 99-102

SPERLING, Marcos. Waste Stabilisation Ponds. 1 ed. Londres: IWA publishing, 2007. p.67.

SUEMATSU, Guillermo León. Texto [en línea]. Aspectos generales y principios básicos de los sistemas de lagunas de estabilización. Programa de tratamiento de Aguas Residuales, Cali. Julio de 1995. [Citado el: 28 de agosto de 2017.] Disponible en Internet: <<http://www.bvsde.ops-oms.org/bvsair/e/repindex/rep157/sil/sil.html>>

TORRES, JJ. SOLER, A. Hydraulic performance of a deep wastewater stabilization pond. En: Hydraulic performance of a deep wastewater stabilization pond. Abril, 1999. Vol. 31. no. 4, p. 679–688.

TORRES, Oscar. Texto [en línea]. Determinación de los Coeficientes de Reacción del Crecimiento Biológico y Decaimiento Endógeno en las Lagunas de Estabilización del Municipio de Zipaquirá. Bogotá. UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA. [Citado el: 29 de marzo de 2018.] Disponible en Internet:< <http://repository.ucatolica.edu.co/handle/10983/14516>>

TREATISE ON WATER SCIENCE. Constructed Wetlands and Waste Stabilization Ponds. Pathumthani. Julio, 2011, Vol. 4.

VANEGAS, Carlos. Texto [en línea]. Carga superficial máxima en lagunas de estabilización de Nicaragua. Managua, Nicaragua. Universidad Nacional de Ingeniería. [Citado el: 19 de abril de 2018.] Disponible en Internet:< <https://www.lamjol.info/index.php/NEXO/article/view/5169>>



VARELA, Gustavo. Fisiología y metabolismo bacteriano. CEFA, 2002. Consultado 13 de abril de 2018. P.43.

VITKO, Tadeo G. Guía para el manejo de lagunas de estabilización. Lima. Centro Panamericano de ingeniería sanitaria y ciencias del ambiente, 1984. p.1. [citado el 3 de septiembre de 2017] Disponible en: <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/scan2/018706/018706.pdf>. p. 2.

WATER RESEARCH. A practical model for sunlight disinfection of a subtropical maturation pond. Gold Coast. Enero, 2017, Vol. 108.



WATER RESEARCH. Hydraulic performance of a deep wastewater stabilization pond. Murcia. 1999. Abril, 1999, Vol. 31, no 4.

WATER RESEARCH. Verification of two design approaches for stabilization ponds. Loughborough. Septiembre, 1993, Vol. 27, no 9.

YÁÑEZ, Fabián. Lagunas de estabilización. 1 ed. Ecuador: Monsalve, 1993. p.9,69.

## ANEXOS

### Anexo A. Reporte de laboratorio primer muestreo

 <p style="font-size: small; color: red;">Corporación Integral del Medio Ambiente</p>	<p>LABORATORIO DE AGUAS Y SUELOS</p> <p>REPORTE DE RESULTADOS A-3153</p>	 <p style="font-size: x-small;">El alcance de la acreditación es el detallado en las Resoluciones 0918 del 17 de mayo del 2016, 0217 del 19 de enero del 2017 y 0965 del 08 de mayo de 2017, proferidas por el IDEAM</p>	
<b>BOGOTÁ D. C., 2017-12-15</b>			
INFORMACION DEL CLIENTE		INFORMACION DEL MUESTREO	
Nombre del Cliente	DANNY ALEJANDRA ROMERO	Fecha de recepción de muestras	2017-11-21
NIT	101.847.738-8	Fecha de inicio de Análisis	2017-11-21
Dirección	Cll 8 sur No. 22-10 Bloq 7 casa 34-Soacha	Fecha de finalización de Análisis	2017-12-05
Contacto	danny Alejandra Romero	Proyecto	Universidad Católica
Télefono	3105688580	Plan de muestreo CIMA	N.A.
Correo electrónico	daromeri99@ucatolica.edu.co	Muestreo realizado por	Danny Alejandra Romero
		Localización (Departamento/Ciudad)	Cundinamarca/Mosquera
		Sitio de muestreo	Industria
		Versión de reporte de resultados	1
		No de Anexos	1

RESULTADOS					
VARIABLE	TIPO	UNIDADES	25540	25541	25542
DBO5(Demanda Bioquímica de Oxígeno)	A.C.	mgO <sub>2</sub> /L	2010	336	281
DQO (Demanda Química de Oxígeno)	A.C.	mg O <sub>2</sub> /L	11552	5504	4544

VARIABLE	TIPO	UNIDADES	25543	25544	25545
DBO5(Demanda Bioquímica de Oxígeno)	A.C.	mgO <sub>2</sub> /L	527	1088	434
DQO (Demanda Química de Oxígeno)	A.C.	mg O <sub>2</sub> /L	5024	7744	5024

VARIABLE	TIPO	UNIDADES	25546
DBO5(Demanda Bioquímica de Oxígeno)	A.C.	mgO <sub>2</sub> /L	300
DQO (Demanda Química de Oxígeno)	A.C.	mg O <sub>2</sub> /L	5760

Los resultados expuestos en el presente reporte son únicamente válidos para las muestras analizadas, su reproducción total o parcial queda prohibida salvo previa autorización escrita por parte de CIMA

Sede Laboratorio: Carrera 32 No 8 -93 Sur Sede Administrativa: Carrera 35A No 1C-29

Tel: (571) 3000697 - 7044746 /

E-mail: cima@cimambiente.com

www.cimambiente.com

Código: FL-001

Versión: 2.2-00

Fecha: 2016-07-13

Página 1 de 1

## Anexo B. Reporte de laboratorio segundo muestreo



LABORATORIO DE AGUAS Y SUELOS  
 REPORTE DE RESULTADOS A-3491



El alcance de la  
 acreditación es el detallado  
 en las Resoluciones 0918  
 del 17 de mayo del 2016,  
 0217 del 10 de enero del  
 2017 y 0965 del 08 de  
 mayo de 2017, proferidas  
 por el ICGAM

BOGOTÁ D. C., 2018-01-13

INFORMACION DEL CLIENTE		INFORMACION DEL MUESTREO	
Nombre del Cliente	DANNY ALEJANDRA ROMERO	Fecha de recepción de muestras	2017-12-14
		Fecha de inicio de Análisis	2017-12-14
NIT	101.847.738-8	Fecha de finalización de Análisis	2018-01-12
		Proyecto	UNIVERSIDAD CATOLICA
Dirección	Cll 8 sur No. 22-10 Bloq 7 casa 34-Soacha	Plan de muestreo CIMA	N.A.
		Muestreo realizado por	DANNY ALEJANDRA ROMERO
Contacto	danny Alejandra Romero	Localización (Departamento/Ciudad)	CUNDINAMARCA/ MOSQUERA
Télefono	3105688580	Sitio de muestreo	INDUSTRIA
		Versión de reporte de resultados	1
Correo electrónico	daromeri99@ucatolica.edu.co	No de Anexos	1

RESULTADOS					
VARIABLE	TIPO	UNIDADES	26976	26977	26978
DBO5(Demanda Bioquímica de Oxígeno)	A.C.	mgO <sub>2</sub> /L	3140	258	892
VARIABLE	TIPO	UNIDADES	26979	26980	26981
DBO5(Demanda Bioquímica de Oxígeno)	A.C.	mgO <sub>2</sub> /L	697	526	590
VARIABLE	TIPO	UNIDADES	26982		
DBO5(Demanda Bioquímica de Oxígeno)	A.C.	mgO <sub>2</sub> /L	569		

Los resultados expuestos en el presente reporte son únicamente válidos para las muestras analizadas, su reproducción total o parcial queda prohibida salvo previa autorización escrita por parte de CIMA

Sede Laboratorio: Carrera 32 No 8 -93 Sur Sede Administrativa: Carrera 35A No 1C-29  
 Tel: (571) 3000697 - 7044746 /  
 E-mail: cima@cimambiente.com  
 www.cimambiente.com

Código: FL-001  
 Versión: 2.2-00  
 Fecha: 2016-07-13  
 Página 1 de 1

## Anexo C. Reporte de laboratorio tercer muestreo



LABORATORIO DE AGUAS Y SUELOS  
 REPORTE DE RESULTADOS A-3932



El alcance de la  
 acreditación es el detallado  
 en las Resoluciones 0918  
 del 17 de mayo del 2016,  
 0317 del 10 de enero del  
 2017 y 0965 del 08 de  
 mayo de 2017, proferidas  
 por el IDEAM

BOGOTÁ D. C., 2018-02-13

INFORMACION DEL CLIENTE		INFORMACION DEL MUESTREO	
Nombre del Cliente	DANNY ALEJANDRA ROMERO	Fecha de recepción de muestras	2018-01-25
		Fecha de inicio de Análisis	2018-01-25
NIT	101.847.738-8	Fecha de finalización de Análisis	2018-02-13
		Proyecto	UNIVERSIDAD CATOLICA
Dirección	Cll 8 sur No. 22-10 Bloq 7 casa 34-Soacha	Plan de muestreo CIMA	N.A.
		Muestreo realizado por	DANNY ALEJANDRA ROMERO
Contacto	danny Alejandra Romero	Localización (Departamento/Ciudad)	CUNDINAMARCA/ MOSQUERA
Télefono	3105688580	Sitio de muestreo	INDUSTRIA
		Versión de reporte de resultados	1
Correo electrónico	daromeri99@ucatolica.edu.co	No de Anexos	1

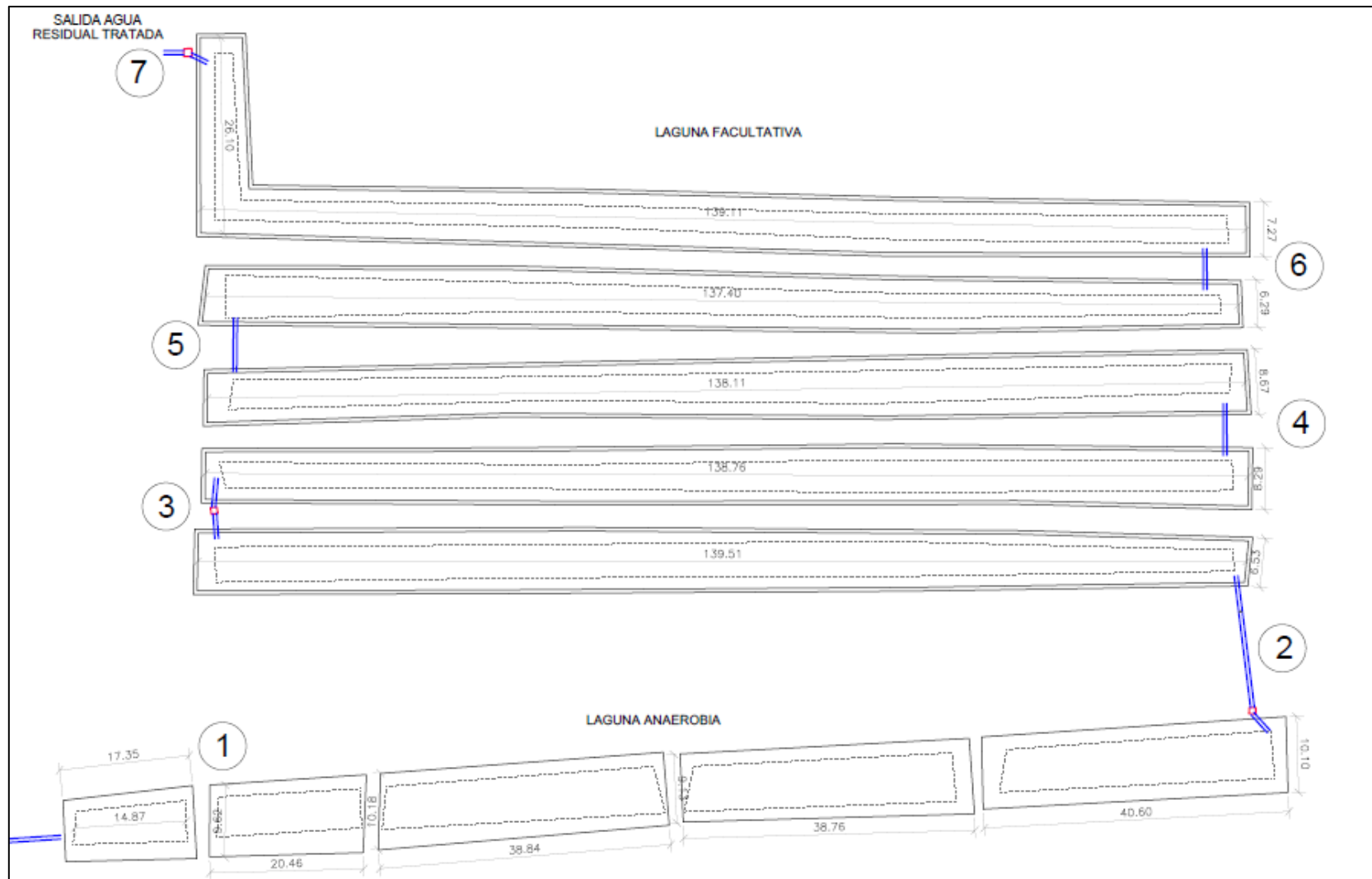
RESULTADOS					
VARIABLE	TIPO	UNIDADES	29743	29744	29745
DBO5(Demanda Bioquímica de Oxígeno)	A.C.	mgO <sub>2</sub> /L	12164	1159	1133
VARIABLE	TIPO	UNIDADES	29746	29747	29748
DBO5(Demanda Bioquímica de Oxígeno)	A.C.	mgO <sub>2</sub> /L	294	215	243
VARIABLE	TIPO	UNIDADES	29749		
DBO5(Demanda Bioquímica de Oxígeno)	A.C.	mgO <sub>2</sub> /L	231		

Los resultados expuestos en el presente reporte son únicamente válidos para las muestras analizadas, su reproducción total o parcial queda prohibida salvo previa autorización escrita por parte de CIMA

Sede Laboratorio: Carrera 32 No 8 -93 Sur Sede Administrativa: Carrera 35A No 1C-29  
 Tel: (571) 3000697 - 7044746 /  
 E-mail: cima@cimambiente.com  
 www.cimambiente.com

Código: FL-001  
 Version: 2.2-00  
 Fecha: 2016-07-13  
 Página 1 de 1

Anexo D. Puntos de toma de muestra y esquema del sistema



Anexo E. Resultados de laboratorio de otros parámetros

RESULTADOS MUESTREO # 1 - FECHA: 21/11/17											
Punto de muestreo	Conductividad (ms/cm)	TDS (g/L)	Resistividad (Ωcm)	Salinidad	Ph	Oxigeno (mg/L)	% O2	Turbiedad (NTU)	Color Apar.(UPC)	Dureza total (mg/L CaCO3)	Sólidos sedim.(ml/L)
P1	1,404	0,753	710	0,7	11,3	1,2	17	387	4032	490	125
P2	0,00237	1,27	422	1,1	6,72	0,7	10	249	3397	480	6,5
P3	2,41	1,29	414	1,1	6,9	0,8	11	557	1162	476	0,5
P4	0,27	1,21	443	1,1	7,3	0,8	11	663	1203	460	3,5
P5	2,1	1,12	476	1,1	7,5	0,8	10	612	1505	432	0,7
P6	14,612	0,783	682	0,7	7,4	3,2	46	738	860	310	2
P7	1,514	0,813	658	0,7	7,4	3,2	46	489	779	300	1,7

RESULTADOS MUESTREO # 2 - FECHA: 14/12/17											
Punto de muestreo	Conductividad (ms/cm)	TDS (g/L)	Resistividad (Ωcm)	Salinidad	Ph	Oxigeno (mg/L)	% O2	Turbiedad (NTU)	Color Apar.(UPC)	Dureza total (mg/L CaCO3)	Sólidos sedim.(ml/L)
P1	2,37	1,26	423	1,1	12,1	0,2	2		1716	490	2,4
P2	2,34	1,27	423	1,1	7,23	0,2	3		2815	480	15
P3	2,58	1,38	338	1,3	7,26	0,1	2		1273	476	0,1
P4	2,47	1,32	405	1,2	7,72	0,1	2		1435	460	0,1
P5	2,35	1,26	426	1,1	8,06	0,2	2		2021	432	1
P6	2,30	1,23	435	1,1	8,16	0,2	2		1649	310	0,1
P7	2,22	1,19	449	1	8,37	0,2	3		1608	300	1

RESULTADOS MUESTREO # 3 - FECHA: 15/02/18											
Punto de muestreo	Conductividad (ms/cm)	TDS (g/L)	Resistividad (Ωcm)	Salinidad	Ph	Oxigeno (mg/L)	% O2	Turbiedad (NTU)	Color Apar.(UPC)	Dureza total (mg/L CaCO3)	Sólidos sedim.(ml/L)
P1	-	-	423	-	-	-	-	-		-	-
P2	2,59	1,39	423	1,3	7,23	-	-	521	4866,4	-	8,44
P3	2,44	1,29	338	1,1	7,27	-	-	68,5	1234,8	-	2,56
P4	0,00602	0,00304	405	-	7,64	-	-	86,2	1658,4	-	0,625
P5	0,0041	0,00231	426	-	8,08	-	-	149	2001,1	-	0,71
P6	0,00327	0,0017	435	-	8,14	-	-	120	1818	-	1,43
P7	0,00264	0,00145	449	-	8,3	-	-	100	1377,8	-	1,14